

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

LUTSK NATIONAL
TECHNICAL UNIVERSITY

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В МАШИНОБУДУВАННІ
ТА ТРАНСПОРТІ**

**ADVANCES
IN
MECHANICAL ENGINEERING
AND TRANSPORT**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC JOURNAL

ISSN 2313-5425

№1 (24)

2025

ЛУЦЬК LUTSK

Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2025.– №1(24).– 456 с.

В матеріалах наукового журналу висвітлюються результати наукових досліджень та науково-дослідних розробок в галузі машинобудування, автомобільного транспорту, транспортних систем і транспортних технологій на автомобільному транспорті, а також, математичного та комп'ютерного моделювання технічних процесів та систем.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації – КВ №20504-10304Р від 30.12.2013р.

Науковий журнал включений до Переліку наукових фахових видань України згідно наказу Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р.

Ідентифікатор медіа R30-02530 (рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення №40 від 11.01.2024 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор: **Пустюльга Сергій Іванович**, д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет.

Заступник головного редактора: **Дударєв Ігор Миколайович**, д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет;

Випусковий редактор: **Самостян Віктор Русланович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет.

Відповідальний секретар: **Онищук Василь Петрович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет.

Члени редколегії: **Бартломейчик Миколай**, доктор інженерії, Гданський технологічний університет (Республіка Польща); **Заболотний Олег Васильович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Захарчук Віктор Іванович**, д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет; **Кравченко Олександр Петрович**, д.т.н., професор, University of Žilina, Slovenská Republika; **Луїс Фролен Рібейро**, професор, Політехнічний Інститут Браганси (Португалія), **Мурований Ігор Сергійович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Налобіна Олена Олександрівна**, д.т.н., професор, Національний університет водного господарства та природокористування, **Поляк Мілош**, PhD, професор, декан факультету управління транспортом та телекомунікацій University of Žilina, Slovenská Republika, **Пуць Віталій Степанович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Сахно Володимир Прохорович**, д.т.н., професор, Національний транспортний університет; **Славінскас Стасіс**, д.т.н., професор, Університет Вітовта Магнуса (Каунас, Литва), **Таран Ігор Олександрович**, д.т.н., професор, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukaszewicza, (Республіка Польща), **Цизь Ігор Євгенович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет; **Шимчук Сергій Петрович**, к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет.

Друкується за рішенням вченої ради
Луцького національного технічного університету
(Протокол № 9 від 16.05.2025р.)

ЗМІСТ		CONTENT	
Бернацький А. В., Сіора О. В., Юрченко Ю. В., Лукашенко В. А., Гардер Д. А. Відпрацювання технології лазерного зварювання тонкостінного кільцевого з'єднання для виготовлення корпусної конструкції датчика.....	6	Bernatskyi A. V., Siora O. V., Yurchenko Yu. V., Lukashenko V. A., Harder D. A. Development of the technology of laser welding of a thin-walled girth joint for the manufacture of the housing structure of the sensor	6
Горбик Ю.В. Метод визначення динамічних характеристик паливних форсунок з електромагнітними приводами клапанів.....	16	Gorbik Yu. V. Method for determining dynamic characteristics of fuel injectors with electromagnetic valve actuators.....	16
Гнип М.М. Енерго-економічні результати використання методу зниження втрат енергії пересувних дизельних компресорних станцій шляхом додаткового охолодження стиснених газів	22	Гнип М.М. Energy-economic results of using the method of reducing energy losses of mobile diesel compressor stations by additional cooling of compressed gases.....	22
Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Середня швидкість щільного транспортного потоку з двома повільними автомобілями на ділянці дороги з обмеженими можливостями маневрування.....	30	Horbachov P., Svichynskyi S. The average vehicle speed in a dense traffic flow with two slow-moving vehicles on a road section with limited manoeuvring opportunities	30
П. Мовчан, О. Шарко. Структурування основних напрямів досліджень, моделей та методів управління морським транспортом.....	45	Movchan P., Sharko O. Structuring the main research areas, models and methods of maritime transport management.....	45
Пелех О. Р. Аналіз методів та моделей досліджень систем підресорювання автомобілів	60	Pelekh O. Analysis of methods and models for studying vehicle suspension systems	60
Пустюльга С.І., Самчук В.П., Головачук І.П., Приступа О.В., Лелик Я.Р. Аналіз методів розрахунку фрактальної розмірності як інструменту удосконалення експлуатаційних та безпечових характеристик об'єктів автомобільного транспорту	69	Pustiulha S.I., Samchuk V.P., Holovachuk I.P., Prystupa O.V., Lelyk Ja.R. Analysis of methods for calculating fractal dimension as a tool for enhancing performance and safety characteristics of automotive transport objects.....	69
Середа Б.П., Муковська Д.Я., Зюзін Є.П., Орел В.Г. Екологічні аспекти побудови транспортної системи: від ідеї до реалізації	83	Sereda B., Mukovska D., Zyuzin E., Orel V. Environmental aspects of transport system development: from concept to implementation.....	83
Шарко О., Дорошенко О. Підвищення ефективності транспорту шляхом оптимізації структури управління складними логістичними схемами.....	89	Sharko O., Doroshenko O. Increasing the efficiency of transport by optimising the management structure of complex logistics scheme.....	89
Зибцев Ю.В., Ворошилов П.А. Вплив тиску в шині на динамічні характеристики автомобіля і опір руху...	102	Zybtsev Y.V., Voroshylov P.A. The influence of tire pressure on the dynamic characteristics of the car and resistance to movement	102
Зибцев Ю.В., Ворошилов П.А. Ефективність різних приводів трансмісій	107	Zybtsev Y.V., Voroshylov P.A. Efficiency of different drives and transmissions.....	107
Бойків Р.В. Аналіз граничних часових інтервалів на нерегульованому перехресті з інтенсивним лівопоротним потоком.....	112	Boikiv R.V. Analysis of limit time intervals at unsignalized intersection with high rate of left-turning vehicles	112
Бохонко А. В. Аналіз прохідності автомобіля з аерокомпенсатором	121	A. Bokhonko. Analysis of the off-road performance of a vehicle equipped with an aero-compensator.....	121
Булík Ю.В., Павлюк В.І., Куць Н.Г., Онищук В.П. Особливості побудови зубчастих коліс конічної передачі з круговою формою зубів у програмних комплексах тримірної моделювання	131	Y. Bulik, V. Pavliuk, N. Kuts, V. Onyshchuk. Features of modeling bevel gear wheels with circular tooth profile in 3d modeling software.....	131
Біліченко В.В., Матвійчук Д.М. Огляд сучасних віброакустичних методів контролю шуму дизельних двигунів з метою їх подальшого використання в симуляції робочого процесу двигуна.....	138	V. Bilichenko, D. Matvijchuk Review of modern vibroacoustic noise control methods for diesel engines with the aim of their further use in engine operation simulation.....	138
Виноградов М.С., Макарова Т.В., Мастепан М.А., Савенок Д.В. Дослідження впливу технологічних факторів хонінгування силікатними брусками на параметр шорсткості поверхні деталей автомобільного двигуна.....	147	M. Vynogradov, T. Makarova, M. Mastepan, D. Savenok Study of the influence of technological factors of honing with silicate bars on the surface roughness of automobile engine parts	147

Волков В. П., Онищук В.П., Волкова Т.В., Левчук М.А. Інтеграція інформаційно – програмного комплексу в віртуальне підприємство автомобільного транспорту.	157	Volkov V. P., Onyshchuk V. P., Volkova T. V., Levchuk M. A. Integration of an information-software complex into a virtual road-transport enterprise.....	157
Гандзюк М.О. Пошук оптимальних рішень у гетерогенних динамічних автотранспортних системах.....	170	M. Handziuk Search for optimal solutions in heterogeneous dynamic road transport systems.....	170
Глиняний В.С., Цимбал С.В. проблемні аспекти та напрями вдосконалення пасажирських перевезень.....	180	V.Glynianyi, S. Tsymbal. Problem aspects and directions for improvement of passenger transportation.....	180
Дембіцький В.М., Самостян В.Р. Підвищення ефективності управління автотранспортом на основі оцінки його надійності та якості	188	V. Dembitskiy, V. Samostian. Improving the efficiency of road transport management based on the assessment of its reliability and quality.....	188
Дитятьєв О.В. До аналізу нового методу діагностики амортизаторів у підвісці автомобіля.....	200	O. Dityatyev. To the analysis of a new method for diagnosing shock absorbers in the suspension of a car.....	200
Захарчук В.І., Захарчук О.В., Швабюк В.В., Ярошук В.В. Переобладнання дизеля для роботи на пропан-бутані	209	V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, V. Shvabyuk, V. Yaroshuk. Conversion of a diesel engine to operate on propane-butane	209
Кишун В.А. Український ринок автомобілів-гібридів	216	V. Kyshchun. The Ukrainian hybrid car market	216
Козак С.В., Хітров І.О. Безпека транспортної діяльності та аналіз ефективності персонального електричного транспорту шляхом включення до єдиної транспортної системи України	226	S. Kozak, I. Khitrov. Security of transport activities and analysis of the efficiency of personal electric transport through inclusion into the unified transport system of Ukraine	226
Корпач О.А., Трубенко А.А. Вибір методу апроксимації швидкісної зовнішньої характеристики дизеля	233	O. Korpach, A. Trubenok Optimal approximation method for diesel engine external speed characteristics	233
Крайник Л.В., Дуфанець І.Г. Формування схеми приводу гальм і диференту моноблочного кузова тривісного автобуса.....	245	L. Krainyk, I. Dufanets Formation of the brake and differential drive scheme of the mono-block body of a three-axle bus.....	245
Криштопа С.І., Криштопа Л.І., Добуш А.І., Мисів О.О., Матвієнко Р.М., Копильців Д.В. Огляд застосування енергетичних повітряних систем на транспорті	251	S. Kryshstopa, L. Kryshstopa, A. Dobush, O. Mysiv, R. Matvienko, D. Kopyltsiv. Review of the application of air power systems in transport	251
Куць Н.Г., Булік Ю.В., Дубицький О.С., Мазилук П.В. Радіотехнічна діагностика автомобіля	264	Kuts N.G., Bulik Y.V., Dubytskyi O.S., Mazylyuk P.V. Radio technical diagnostics of a car	264
Мармут І.А., Шестов С.О. Удосконалення методики перевірки каналів вимірювання гальмівних параметрів автомобілів на інерційному роликовому стенді	273	I. Marmut, S. Shestov. Improvement of the method of checking the channels for measuring the braking parameters of vehicles on the inertial roller stand.....	273
Мельник Р.В., Цимбал С.В. Інноваційні технології: BLOCKCHAIN та штучний інтелект у логістиці та автомобільних перевезеннях	284	R. Melnyk, S. Tsymbal. Innovative technologies: blockchain and artificial intelligence in logistics and road transport	284
Михайлик В.Г., Шаповал М.В. Визначення потужності гідроприводного однопоршневого розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму	291	Mykhailek V.G., Shapoval M.V. Determination of the power of a hydraulic-driven single-piston mortar pump with a combined compensator of increased volume	291
Мокряк Б.Ю. Аналіз досліджень пневматичних автомобільних двигунів.	303	B. Mokriak. Analysis of research on pneumatic automotive engines ...	303
Монастирський Ю. А., Борис Д. С. Визначення мінімальної ефективної продуктивності свердловинного гідромоніторного обладнання при відбійці маломіцних залізних руд.....	313	Y. Monastyrskiy, D. Borys. Determination of the minimum effective productivity of borehole hydraulic monitoring equipment for the extraction of low-strength iron ores	313
Никончук В.М., Козак С.В. Реалізація принципів зеленої логістики в транспортно-логістичній діяльності підприємств.....	319	V. Nykonchuk, S.Kozak. Implementation of green logistics principles in the transport and logistics activities of enterprises	319
Онищук В.П., Стельмащук С.В., Скохильас А.Ю. До визначення стійкості автомобіля категорії М1 з причепом		Onyshchuk V., Stelmashchuk S., Skochylias A. On determining the stability of an M1-category vehicle with an O2-	

категорії О2 у гальмівному режимі.....	327	category trailer during braking....	327
Орисенко О.В., Шаповал М.В., Криворот А.І., Васильєв О.С. Дослідження та порівняльний аналіз трудомісткостей та вартості операцій ТО кросоверів Toyota Rav4 2.0 AWD-i та Toyota Rav4 hybrid AWD-i в умовах СТО....	336	Orysenko O.V., Shapoval M.V., Kryvorot A.I. Vasiliev O.S. Research and comparative analysis of the labor intensifiedness and costs of operations for Toyota Rav4 2.0 AWD and Toyota Rav4 hybrid AWD crossovers in service shop conditions.....	336
Петрюк Ю.І. Артюх О.М. Інноваційні підходи до землеробства: автоматизація і роботизація машинотракторних агрегатів для оптимізації витрат та збереження ґрунтів.....	348	Y. Petriuk, O. Artyukh. Innovative approaches to agriculture: automation and robotisation of machine tractor units for optimization of costs and conservation of soils.....	348
Приходько В.Е. Оцінювання енергоефективності сучасних автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень.....	355	Prykhodko V. Energy efficiency assessment of modern road trains for international freight transportation.....	330
Савін Ю.Х., Соколенко О.В. Контроль технічного стану транспортних засобів шляхом аналізу інформації з бортової діагностики в процесі експлуатації	367	Savin Y. F., Sokolenko O. V. Control of the technical condition of vehicles through analysis of information from on-board diagnostics during operation	367
Сафаров Е.Г., Романюк О.О., Смачило О.В. Механічні властивості поліамідів при динамічному навантаженні	375	E.Safarov, O.Romaniuk, O.Smachylo, Mechanical properties of polyamides under dynamic loading	375
Сахно В.П., Маяк М.М., Мурований І.С., Котенко А.С. До визначення маневреності шарнірно-з'єднаних автобусів із самоустановлювальною віссю причепа..	380	V. Sakhno, M. Maiak, I. Murovanyi, A. Kotenko. To the determination of maneuverability of articulated buses with a self-steering trailer axle	380
Свічинська О.В. Формування стратегії управління міжнародними перевезеннями на основі закономірностей розподілу логістичних показників	392	O. Svichynska. The Formation of the International Transportation Management Strategy Based on the Regularities of the Distribution of Logistics Indicators	392
Сивулька П.М., Сукач О.М. Оцінка площі плями контакту шини на ґрунтових поверхнях.....	399	Syvulka P.M., Sukach O.M. Assessment of tire contact spot area on soil surfaces	399
Стефанов В.О., Дзержинський І.В. Оптимізація роботи баштового крана за допомогою автоматизованих систем управління.....	409	V. Stefanov, I. Dzerzhynskyi. Optimization of tower crane operation using automated control systems.....	409
Формальчик Є.Ю., Гілевич В.В. До визначення рівня якості обслуговування перевезення вантажів.....	418	Ye. Fornalchyk, V. Hilevych. To determining the level of service of cargo transportation.....	418
Холодова О.О., Бугайова М.О. Ефективність проїзду ділянки вулично-дорожньої мережі міста з урахуванням впливу припаркованих транспортних засобів.....	423	O. Kholodova, M. Buhaiova. Efficiency of the city's street and road network, considering the impact of parked vehicles.....	423
Цинь Сюсюань, Любий Є.В. Теоретичне обґрунтування результатів генерації матриць пасажирських кореспонденцій випадковим методом.....	438	X. Qin, Ye. Liubyi Theoretical justification of the results of passenger correspondence matrix generation using a random method.....	438
Чернега В.Ю. Застосування системи «колесо-дорога» при здійсненні перевезень автомобільним транспортом...	447	Chernega V.Yu. Application of the "wheel-road" system in road transportation.....	447
Перелік рецензентів	454	List reviewers	454

Bernatskyi A. V., Siora O. V., Yurchenko Yu. V., Lukashenko V. A., Harder D. A.
E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF LASER WELDING OF A THIN-WALLED GIRTH JOINT FOR THE MANUFACTURE OF THE HOUSING STRUCTURE OF THE SENSOR

Thin-walled products with girth welded joints are widely used in modern machine building and instrumentation, where the quality of welded joints is subject to particularly high requirements. Welding of such products is accompanied by a number of technological challenges, especially when laser welding is used. The main problems are the instability of the metal remelting process due to the small diameters of the focused laser radiation, the risk of burns, lack of penetration, pore formation, and localized weakening of the joint due to overheating. In this work, laser welding of girth welded joints of sensor housings made of AISI 304 stainless steel was studied using a fiber laser YLR-400-WC. Welding was performed in a pulsed mode with a frequency of 1000 Hz using high-purity argon as a shielding gas. To ensure high quality of welded joints, special technological solutions were used: smooth increase and decrease of laser power at the beginning and end of the welded joint to avoid cratering, use of a precision rotator with high positioning accuracy, and modernization of the design of the welded edges. During the experiments, it was found that the original scheme with flanging only on the cover of the sensor part led to depressurization due to overheating in the area where the sensor contacts are attached. To eliminate this problem, a new design scheme was developed with remote flanges on the sensor cover and flange, and a heat dissipation system with an aluminum spacer and thermal paste applied to it was introduced. Additionally, a metal ball was used to stabilize the rotation, which reduced friction. The results of the study confirmed the effectiveness of the proposed solutions: stable formation of a tight welded joint without defects and local overheating was achieved. The data obtained demonstrate the prospects of using laser welding for girth joints of thin-walled products, provided that the design of the welded elements is optimized and the thermal regime is controlled.

Keywords: laser welding, thin-walled products, development of welded joint design, flanging, parts with a rotation axis, stainless steels, AISI 304.

INTRODUCTION

Thin-walled products with girth welded joints play an important role in modern mechanical engineering and instrumentation. They are used in a variety of industries, including aviation and space technology, power engineering, food processing, chemical production, medical equipment, etc. [1-3]. These industries have increased requirements for the quality of welded joints, as even minor defects can lead to a decrease in tightness, loss of strength, or failure of the assembly during use. One of the most common materials for the manufacture of thin-walled welded structures is stainless steel, in particular AISI 304 [4]. This material combines high corrosion resistance in a wide range of aggressive environments, good mechanical properties, structural stability at low and high temperatures, and weldability without a tendency to hot crack formation. Due to these properties, AISI 304 is a universal material for structures operating under dynamic loads, temperature changes, and aggressive environments [4]. The Ukrainian industry traditionally uses such welding methods as plasma, electron beam, and argon arc (TIG) welding to join thin-walled parts with girth welds [5]. These methods can achieve a sufficient level of quality, but have a number of limitations. Electron beam welding requires the use of vacuum chambers that limit the dimensions of the parts to be welded; complex electron beam control systems, which significantly increases the cost and complexity of the equipment. Although TIG welding is more flexible in application, it forms a larger heat affected zone, which causes higher levels of residual stresses and deformations compared to other welding methods [6-7]. In this regard, laser welding, a technology that allows for the formation of high-quality welded joints with a minimum heat affected zone, is becoming increasingly widespread. One of the key advantages of laser welding is the ability to weld without the use of vacuum chambers and complex positioning systems, which significantly reduces time and resources spent on preparing the welding process. In addition, laser welding ensures the stability of the product geometry due to minimal residual deformations and stresses [8].

LITERATURE ANALYSIS AND PROBLEM STATEMENT

In the process of implementing both laser and electron beam welding for girth welded joints of thin-walled products, there are problems associated with the design of the joint, since these welding methods have small diameters of focus spots. In particular, with small wall thicknesses and concentric surfaces of the welded parts, there is a problem of insufficient volume of melted metal in the welded joint zone [9]. This reduces the stability of the penetration process and can lead to the formation of defects such as burn-throughs, lack of fusion, pores, and cause a decrease in joint strength due to its local weakening [10].

The article on electron beam welding of Mo-Ti-Zr alloy gas valve elements discusses measures to improve the structure and tightness of welded joints [9]. It is noted that traditional methods, such as preheating, careful edge preparation, and remelting, although reducing the risk of pore formation, were not effective enough to ensure high ductility and reliability of welded joints. They did not solve the problem completely, but were retained in the technological process due to their possible positive impact on structural transformations during crystallization.

The research focused on constructive improvement of the shape of the welded edges. It was found that one of the most effective ways to reduce the possibility of pores and crystallization cracks is to change the geometry of the joint. The use of flanging of the welded edges made it possible to implement a more favorable melt solidification scheme, where the primary crystallites in the process of melt solidification do not contact the vertices but the side faces, which significantly increases the crack resistance of the weld. As a result of the gradual improvement of the component design and assembly scheme, the manufacturability of the welding process was improved (Fig. 1).

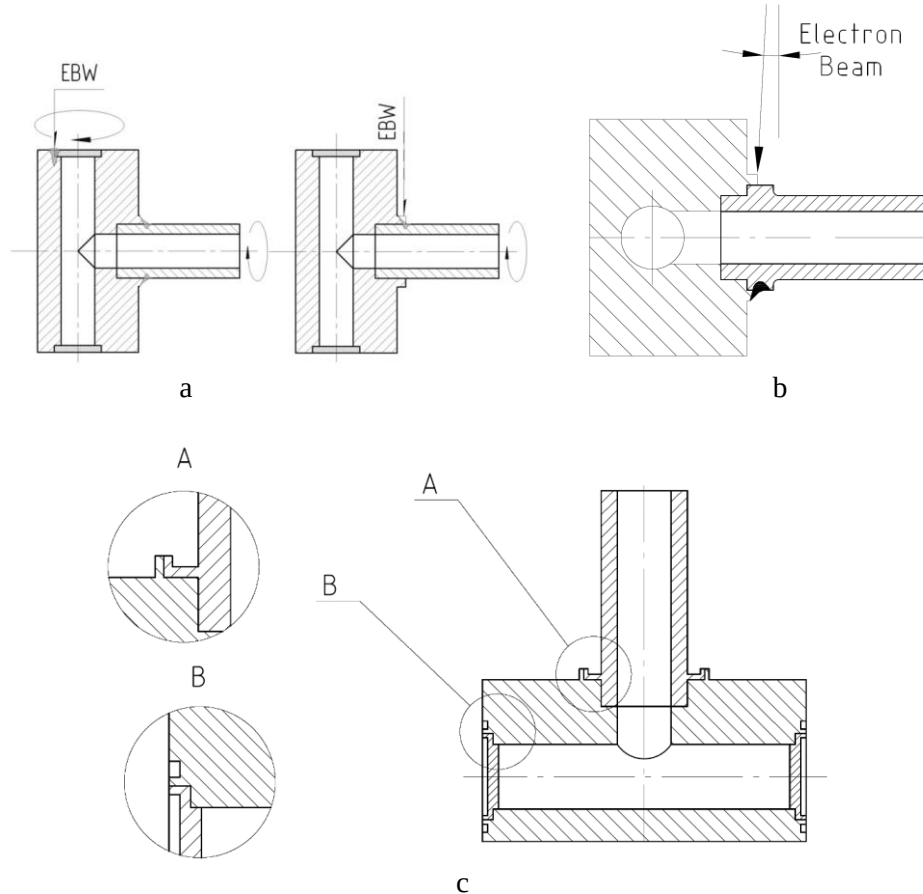


Fig. 1. Three stages of modernization of the design of welded joints of the assembly: (a) welding of the nipple with the housing “in the lock” was replaced by a scheme with a ‘collar’ fused to the nipple wall, the housing with plugs - “in the lock”, (b) the nipple was modified for welding with an inclined electron beam, (c) modernization of the joints of fittings in the form of flanging the edges of the joint [9].

As part of the modernization of the welded joint design, the study considered several configuration options that affect the quality of weld formation during electron beam welding of gas valve elements.

In one of these variants (Fig. 1, b), the deflection angle and focus position of the electron beam were adjusted, which made it possible to weld three joints in one vacuum of the welding chamber. This significantly increased the productivity of the process. However, during the welding process, it turned out that the existing gaps in the joints of the parts - the housing, fittings and plugs - made it impossible to achieve the required tightness of the joints, which was confirmed during hydraulic tests. In order to eliminate this problem, it was proposed to use the H7/p6 type fit, which provides guaranteed tension in the joint, eliminating the gap in the joint. To implement this solution, high-precision grinding of the contact surfaces of the parts before welding was performed. This technological addition made it possible to achieve high assembly accuracy and ensure the tightness of the entire assembly.

Further improvement led to the development of a variant with flanging of the joint edges (Fig. 1, c), which was adopted as the basic one. This version changed the geometry of the joint, which simplified the positioning of the elements before welding. There is no longer a need to use a tilted beam, as was envisaged in the previous versions. This design not only improves the manufacturability of the process, but also reduces the likelihood of defects associated with inaccurate beam guidance. All welds made according to the updated scheme with a “tight” connection (without a gap in the joint) demonstrated stable formation of the outer bead (Fig. 2), which indicates the effectiveness of the design changes.

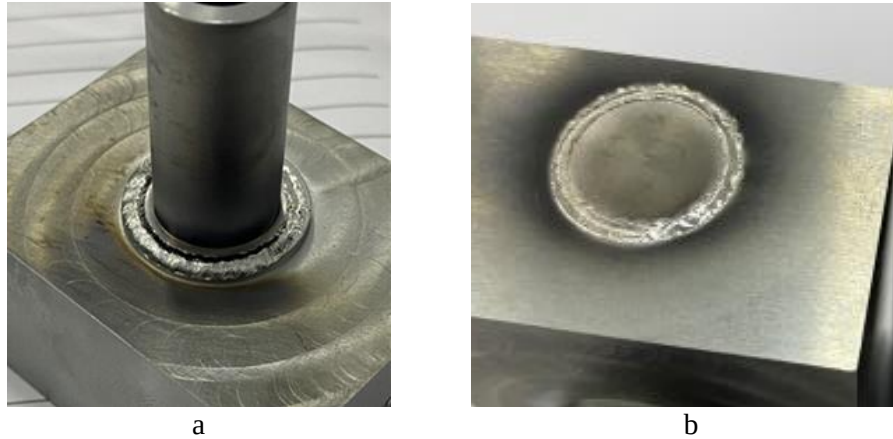


Fig. 2. Formation of girth seams with edge flanging imitating nipple- housing (a) and plug- housing (b) connections [9].

Given that in modern work on welding thin-walled products with an axis of rotation, little attention is paid to modernizing the design of welded joints, this area of research is relevant. The scientific development of new approaches in this area will not only reduce the likelihood of defects, but also increase the efficiency of the welding process, ensure reproducibility of results and expand the scope of laser technologies in precision welding of thin-walled structures.

AIM AND OBJECTIVES OF THE RESEARCH

The aim of the work is to develop the technology of laser welding of girth welded joints made of AISI 304 stainless steel, which is used in the manufacture of the sensor housing.

To achieve this goal, it was necessary to solve the following tasks:

1. Develop an optimal design of the welded joint.
2. To develop a laser welding process that would not cause thermal effects on the sensor part contacts and ensure the tightness of the structure.

RESULTS OF RESEARCH

A 400 W fiber laser YLR-400-WC manufactured by IPG (Germany) was used for laser welding of the girth welded joints of the sensor housing.

The laser radiation was focused using an optical head for laser welding with a focal length of 200 mm (Fig. 3).



Fig. 3. 3D model of the optical head for laser welding

For laser welding of girth welded joints of thin-walled products, an auxiliary precision process tooling was used, which is a precision rotator (Fig. 4).

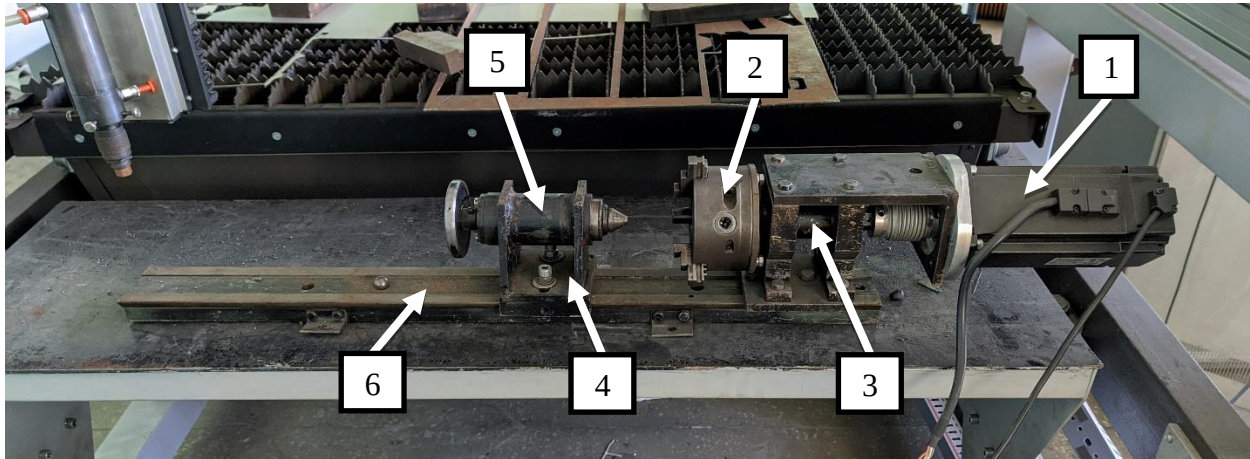


Fig. 4. Precision rotator, where 1 – servo motor, 2 – chuck for clamping the parts of rotation, 3 – front headstock, 4 – rear headstock, 5 – rear headstock pinnacle for supporting the parts of rotation, 6 – bed

Due to the presence of a bed, the precision rotator allows welding parts up to 450 mm long, and parts with a diameter of 6...80 mm can be fixed in the chuck for clamping the parts of the rotation. The servo motor is synchronized with the laser welding machine, which ensures a positioning accuracy of 0.1 mm and repeatability of at least ± 0.08 mm.

The precision rotator allows performing laser welding according to the scheme shown in Fig. 5.

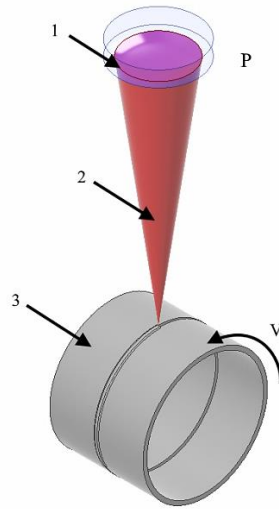


Fig. 5. Schematic of laser welding on a precision rotator, where 1 – lens, 2 – laser beam, 3 – workpiece to be welded

Laser welding was performed in pulse mode with a pulse frequency of 1000 Hz. As a shielding gas for the welding zone from the ambient atmosphere, we used extra-pure argon at a flow rate of 12 l/min. To prevent the formation of craters at the beginning and end of the welded joint, a technique of gradual ramp-up and ramp-down of laser power at the start and end of the welding process, respectively, was employed. The entire welding process was performed continuously, without stopping between program commands. The housing of the sensor part is made of AISI 304 stainless steel, the chemical composition of which is shown in Table 1. The parameters of the laser welding mode are shown in Table 2.

Table 1. Chemical composition of AISI 304 stainless steel, % wt.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
≤0,08	≤0,8	≤2,00	9,00 – 11,00	≤0,02	≤0,035	17,00 – 19,00	≤0,3	≤0,5	Balance

Table 2. Laser welding parameters

Welding stages	Welding speed, V m/min	Welding power, P_{average} W	Rotation relative to the workpiece axis, °
Increasing power	0,3	20	3
	0,3	40	3
	0,3	70	3
	0,3	100	3
Main seam	0,3	200	365
Decreasing power	0,3	100	3
	0,3	70	3

The first scheme of the welded joint design was the “cover with flanging” scheme (Fig. 6). In this scheme, the flanging was made on the cover of the sensor detail.

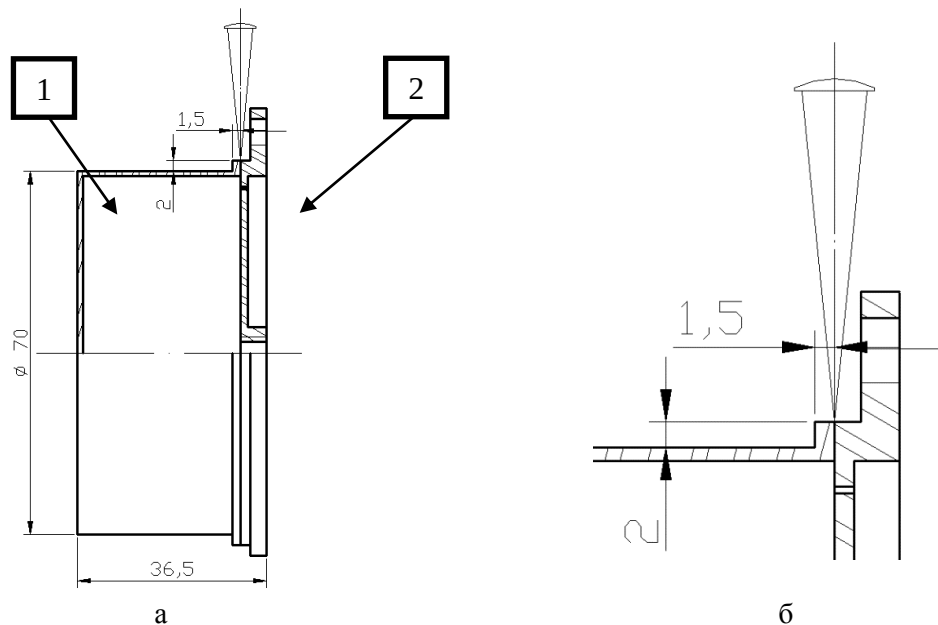


Fig. 6. Welding scheme “cover with flanging”: (a) general view, (b) welding location, where 1 – cover, 2 – flange

In Fig. 7 the process of laser welding and mounting of the sensor detail in the rotator is shown.

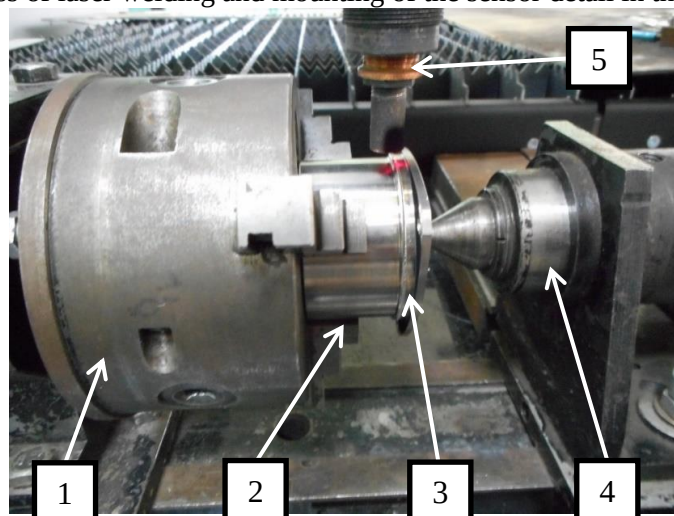


Fig. 7. The process of laser welding according to the “cover with flanging” scheme, and fixing the welded part in the rotator, where 1 – clamping chuck, 2 – sensor part housing, 3 – welded joint, 4 – tailstock, 5 – laser welding head

Fig. 8 shows a welded sensor part using the “cover with flanging” scheme.



Fig. 8. Welded sensor part using the “cover with flanging” scheme

After welding the part, it was discovered that the sensor contact mounting point in the flange was depressurized, as the melting of a relatively large volume of metal caused the welding area and the surrounding metal to overheat. Therefore, it was decided to modernize the geometry of the welded edges and to additionally cool the housing on the side of the sensor contacts.

In the following welding scheme, it was proposed to make a flanging not only on the cover but also on the flange (Fig. 9). To reduce the thermal effect on the sensors mounted in the flange, the welded edges were made in the form of remote flanges measuring 0.5×0.5 mm, and an aluminum spacer with applied thermal paste was used, which is pressed from the side of the sensor mounting point. To reduce the friction during rotation, a metal ball was used, which fits into a special recess in the aluminum spacer and the rotator headstock.

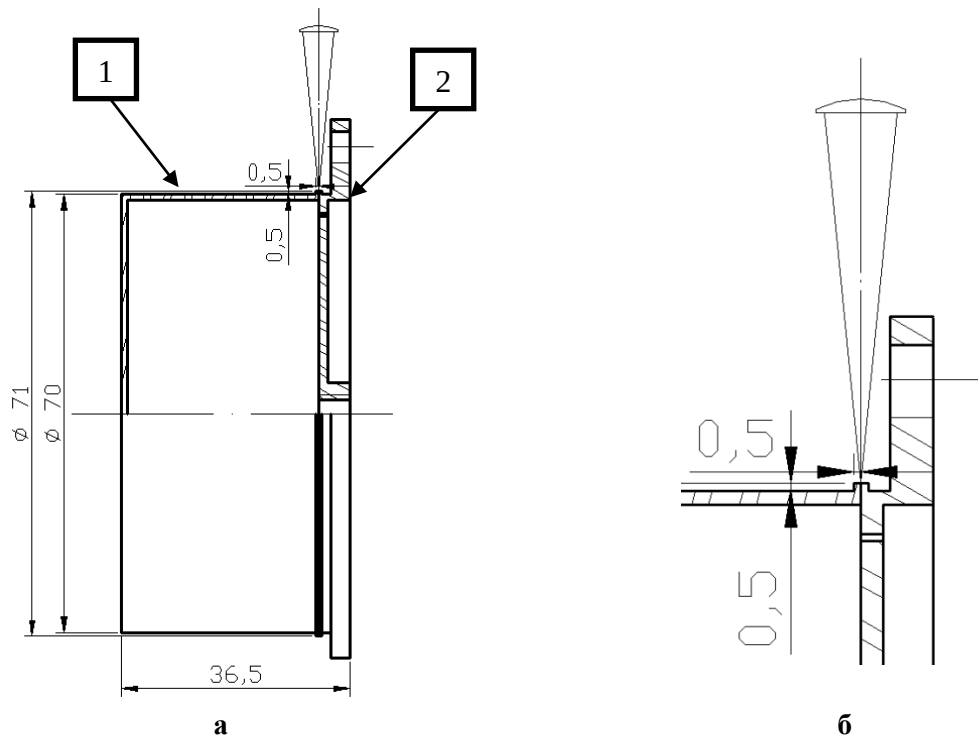


Fig. 9. Welding scheme “cover and flange with flanging”: (a) general view, (b) welding location, where 1 – cover, 2 – flange

Fig. 10 shows the process of laser welding and mounting the part in the rotator.

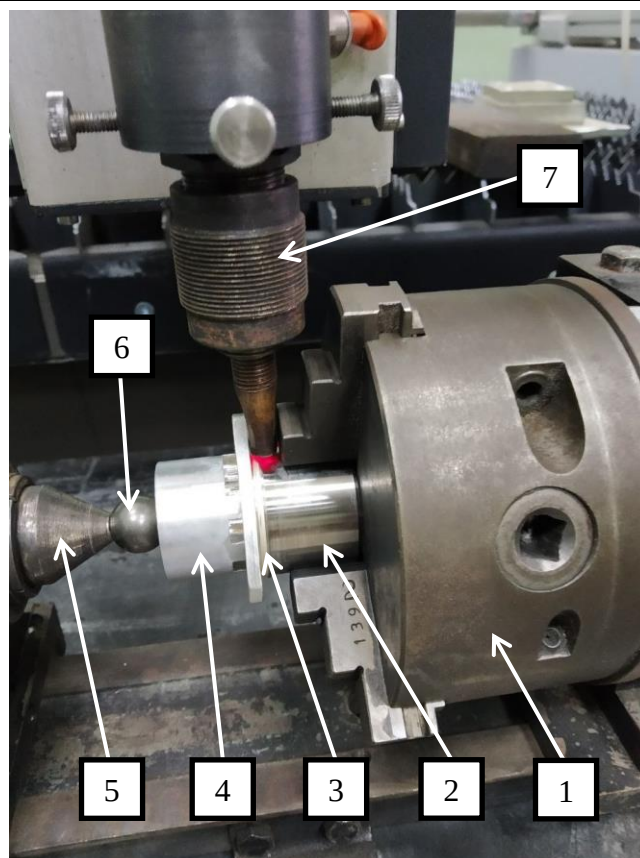


Fig. 10. The process of laser welding according to the scheme “cover and flange with flanging”, where 1 – clamping chuck, 2 – sensor part housing, 3 – welded joint, 4 – aluminum spacer, 5 – tailstock, 7 – metal ball, 6 – laser welding head

As a result of laser welding, a high-quality sealed welded joint was obtained without overheating of the surrounding metal and the sensor mounting point in the flange. Therefore, it can be concluded that the technological decisions made were reasonable.

DISCUSSION OF THE RESEARCH RESULTS

The obtained results of laser welding of sensor parts using a pulsed mode with a frequency of 1000 Hz and the use of high-purity argon as a shielding gas indicate the effectiveness of the proposed technological solutions in ensuring the tightness of the welded joint without overheating of critical parts of the structure. The implementation of gradual ramp-up and ramp-down of laser power at the beginning and end of the welding process made it possible to avoid defects such as crater formation, which could reduce the tightness and strength of the welded joint.

Compared with the results of a study on electron beam welding of gas valve elements made of Mo-Ti-Zr alloy [9], we can note the commonality in approaches to improving the geometry of the welded joint as one of the main factors in ensuring a high-quality welded joint. In contrast to electron beam welding, where the improvement of the joint configuration made it possible to avoid crystallization cracks, the main challenge in this study was to localize the thermal impact in order to prevent overheating of the sensors installed in the flange. The use of remote flanges (0.5×0.5 mm) in combination with a heat-removing aluminum spacer with thermal paste allowed us to effectively implement the concept of a controlled thermal regime. Such solutions were not available in the mentioned article on electron beam welding, where the problem of heat dissipation or impact on neighboring components was not critical. Additionally, the proposed design – a ball that reduces friction during rotation – provided increased positioning stability, which is important for the laser welding process when the workpiece rotates. Another difference is the approach to ensuring tightness. In the aforementioned study, achieving tightness required the use of H7/p6 type fit and high-precision surface grinding, while in the presented work it is ensured primarily due to local control of the thermal regime, the geometry of the welded joint, and a well-thought-out choice of cooling elements. The proposed approaches have demonstrated high efficiency, especially in conditions where even a local temperature excess in sensitive areas of the structure is unacceptable.

CONCLUSIONS

In the course of the research, it was found that laser welding of the sensor component details in the pulsed mode with a frequency of 1000 Hz and the use of high-purity argon as a shielding gas ensures the formation of a high-quality tight welded joint, provided that a number of technological measures are followed. One of the important problems in welding thin-walled products with a axis of rotation was the formation of craters at the beginning and end of the weld. To eliminate them, a technique of gradual ramp-up and ramp-down of laser power at the beginning and end of the welding process, respectively, was applied, which ensured uniform formation of the weld pool and prevented defects in the edge zones of the joint. In addition, structural modernization of the welded edges, including the use of flanging on the cover and the flange, as well as the use of a heat-removing aluminum spacer with thermal paste, prevented localized overheating of the metal in the area of sensor mounting. An additional solution, such as the use of a metal ball in the rotation system, helped reduce friction and stabilize the welding process. Thus, the results of the research confirm the validity of the selected technological solutions. Improvements in the geometry of the welded edges and a well-thought-out organization of heat removal made it possible to eliminate the primary problems, in particular overheating and depressurization, and to achieve stable formation of a high-quality welded joint.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. McNair S. A. M., Chaharsooghi A. S., Carnevale M., Rhead A., Onnela A., Daguin J., et al. Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 118, No 3–4. P. 667–681. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07982-8>
2. Korzhyk V., Khaskin V., Peleshenko S., Grynyuk A., Chunlin D., Illyashenko E., & Yao Y. Selection of parameters of laser welding of thin-walled items from light alloys with nonthrough thickness penetration. *The Paton Welding Journal*. 2022. No 5. P. 16–25. <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.05.03>
3. Wang D., Wang Y., Yang Y., Lu J., Xu Z., Li S., et al. Research on design optimization and manufacturing of coating pipes for automobile seal based on selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 273. 116227. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.008>
4. Dutta S. Different types and new applications of stainless steel. *Stainless steel*. 2018. Vol. 62, No 5. P. 86–91. URL: https://www.researchgate.net/profile/S-Dutta/publication/330383386_Different_Types_and_New_Applications_of_Stainless_Steel/links/5c3d6a31a6fdccd6b5ad9ee0/Different-Types-and-New-Applications-of-Stainless-Steel.pdf (дата звернення 28.04.2025)
5. Zasiadko I. Z., Korinets I. P. Zvariuvannia tonkolystovyykh konstruktsii [Welding of thin sheet constructions]. *Naukovi visti NTUU "KPI"*. 2010. Vol. 5. P. 81–87.
6. Khoshnaw F., Krivtsun I., & Korzhyk V. Arc welding methods. *Elsevier eBooks*. 2023. P. 37–71. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90552-7.00004-3>
7. Ahmad A. Y. Al-Qenaei. Fusion welding techniques. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2016. Vol. 6, No 3. P. 78–83. <https://www.academia.edu/download/47559936/M6302078083.pdf>
8. Deepak J., Anirudh R.P., & Sundar S. S. Applications of lasers in industries and laser welding: A review. *Materials Today Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.102>
9. Zagornikov V., Nesterenkov V., Khripko K., & Ignatusha O. Electron beam welding of gas valve elements from Mo-Ti-Zr alloy. *Automatic Welding*. 2025. Vol. 1. P. 30–39. <https://doi.org/10.37434/as2025.01.05>
10. Madhvacharyula A. S., Pavan A. V. S., Gorthi S., Chitral S., Venkaiah N., & Kiran D. V. In situ detection of welding defects: a review. *Welding in the World*, 2022. Vol. 66, No 4. P. 611–628. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01229-6>

REFERENCES

1. McNair, S. A. M., Chaharsooghi, A. S., Carnevale, M., Rhead, A., Onnela, A., Daguin, J., et al. (2021). Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(3–4), 667–681. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07982-8>
2. Korzhyk, V., Khaskin, V., Peleshenko, S., Grynyuk, A., Chunlin, D., Illyashenko, E., & Yao, Y. (2022). Selection of parameters of laser welding of thin-walled items from light alloys with nonthrough thickness penetration. *The Paton Welding Journal*, 2022(5), 16–25. <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.05.03>

3. Wang, D., Wang, Y., Yang, Y., Lu, J., Xu, Z., Li, S., et al. (2019). Research on design optimization and manufacturing of coating pipes for automobile seal based on selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 273, 116227. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.008>
4. Dutta, S. (2018). Different types and new applications of stainless steel. *Stainless steel*, 62(5), 86–91. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/S-Dutta/publication/330383386_Different_Types_and_New_Applications_of_Stainless_Steel/links/5c3d6a31a6fdccd6b5ad9ee0/Different-Types-and-New-Applications-of-Stainless-Steel.pdf
5. Zasiadko, I. Z., Korinets, I. P. (2010). Zvariuvannia tonkolystovyykh konstrukttsii [Welding of thin sheet constructions]. *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 5, 81–87.
6. Khoshnaw, F., Krivtsun, I., & Korzhyk, V. (2023). Arc welding methods. *Elsevier eBooks*, 37–71. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90552-7.00004-3>
7. Ahmad A. Y. Al-Qenaei. (2016). Fusion welding techniques. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 6(3), 78–83. <https://www.academia.edu/download/47559936/M6302078083.pdf>
8. Deepak, J., Anirudh, R.P., & Sundar, S. S. (2023b). Applications of lasers in industries and laser welding: A review. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.102>
9. Zagornikov, V., Nesterenkov, V., Khripko, K., & Ignatusha, O. (2025). Electron beam welding of gas valve elements from Mo-Ti-Zr alloy. *Automatic Welding*, 1, 30–39. <https://doi.org/10.37434/as2025.01.05>
10. Madhvacharyula, A. S., Pavan, A. V. S., Gorthi, S., Chitral, S., Venkaiah, N., & Kiran, D. V. (2022). In situ detection of welding defects: a review. *Welding in the World*, 66(4), 611–628. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01229-6>

Бернацький А. В., Сіора О. В., Юрченко Ю. В., Лукашенко В. А., Гардер Д. А.
Відпрацювання технології лазерного зварювання тонкостінного кільцевого з'єднання для виготовлення корпусної конструкції датчика

Тонкостінні вироби з кільцевими зварними з'єднаннями широко застосовуються в сучасному машинобудуванні та приладобудуванні, де до якості зварних з'єднань висуваються особливо високі вимоги. Зварювання таких виробів супроводжується низкою технологічних викликів, особливо при використанні лазерного зварювання. Основними проблемами є нестабільність процесу переплавлення металу через малі діаметри сфокусованого лазерного випромінювання, ризик прожогів, непроварів, пороутворення, а також локальне ослаблення з'єднання через перегрів. У роботі проведено дослідження лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань корпусів датчиків із нержавіючої сталі AISI 304 за допомогою волоконного лазера YLR-400-WC. Зварювання здійснювалося в імпульсному режимі з частотою 1000 Гц із застосуванням високочистого аргону як захисного газу. Для забезпечення високої якості зварних з'єднань були використані спеціальні технологічні рішення: плавне наростання та зменшення потужності лазерного випромінювання на початку і в кінці зварного з'єднання для уникнення утворення кратерів, застосування прецизійного обертача з високою точністю позиціонування, а також модернізація конструкції зварюваних крайок. Під час експериментів виявлено, що первісна схема з відбортовкою тільки на кришці **деталі датчика** призводила до розгерметизації через перегрів у зоні кріплення контактів датчика. Для усунення цієї проблеми було розроблено нову конструктивну схему з виносними відбортовками на кришці **деталі датчика** та фланці, а також впроваджено систему тепловідведення з алюмінієвою проставкою і нанесеною на неї термопастою. Додатково для стабілізації обертання використано металеву кульку, що зменшувала тертя. За результатами дослідження підтверджено ефективність запропонованих рішень: досягнуто стабільне формування герметичного зварного з'єднання без дефектів і локального перегріву. Отримані дані демонструють перспективність застосування лазерного зварювання для кільцевих з'єднань тонкостінних виробів за умови оптимізації конструкції зварюваних елементів і контролю теплового режиму.

Ключові слова: лазерне зварювання, тонкостінні вироби, розробка конструкції зварного з'єднання, відбортовка, деталі з віссю обертання, нержавіючі сталі, AISI 304.

БЕРНАЦЬКИЙ *Артемій Володимирович*, кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: Bernatskyi@paton.kiev.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

СІОРА Олександр Васильович, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: siora@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>

ЮРЧЕНКО Юрій Вікторович, аспірант, провідний інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона Національної академії наук України, e-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9253-009X>.

ЛУКАШЕНКО Володимир Андрійович, кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: z_lyk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9685-4654>.

ГАРДЕР Дмитро Андрійович, кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: lukash_d@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4066-8182>.

Artemii BERNATSKYI, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: Bernatskyi@paton.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

Oleksandr SIORA, Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: siora@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>

Yurii YURCHENKO, PhD, Senior Engineer of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9253-009X>.

LUKASHENKO Volodymyr, Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: z_lyk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9685-4654>.

HARDER Dmytro, Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: lukash_d@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4066-8182>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1704

Gorbik Yu. V.
Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU)

METHOD FOR DETERMINING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF FUEL INJECTORS WITH ELECTROMAGNETIC VALVE ACTUATORS

Modern fuel injectors with electromagnetic actuators are critical components of internal combustion engine (ICE) fuel systems, as they determine the accuracy of fuel dosing, combustion efficiency, and the engine's environmental performance. The dynamic characteristics of injectors, such as response speed, stability of cyclic fuel supply, and compliance with control signals, directly influence engine operation quality. However, over time, these parameters degrade due to wear, contamination, or material degradation, leading to increased emissions of harmful substances, higher fuel consumption, and reduced engine power. The article proposes a diagnostic method for assessing the dynamic characteristics of injectors, which can be used without disassembly or with disassembly. This approach enables early detection of deviations, optimization of maintenance processes, reduction of maintenance labor intensity, and serves as a valuable tool for training specialists in the field of automotive transport (specialty 274 "Automotive Transport").

Injector testing without removal is performed through a comparative analysis of parameters across all engine injectors. Key diagnostic parameters include: Cyclic fuel supply correction – deviations in the actual volume of fuel injected per cycle compared to the value set by the electronic control unit (ECU). Control signal characteristics – analysis of the shape, amplitude, and duration of pulses sent to the electromagnetic actuator. Injector coil resistance – indicates the condition of electrical components (e.g., open circuits, short circuits). Nozzle opening delay time – the interval between the control signal and the start of nozzle movement during actuator activation, critical for injection synchronization. To evaluate an injector's condition, all diagnostic parameters must be measured. A deviation in at least one parameter from its nominal value indicates a malfunction or contamination of the tested injector. The article presents a method for determining the dynamic characteristics of fuel injectors with electromagnetic valve actuators.

Key words: microprocessor control systems, electromechanical converter, injector valves, valve solenoid, method of registering valve or armature movement.

INTRODUCTION

The operation of an internal combustion engine (ICE) is based on the conversion of the chemical energy of fuel into mechanical work. The efficiency of this conversion directly affects the engine's performance characteristics, such as fuel economy and exhaust gas emissions. The widespread implementation of microprocessor-based control systems (MPCS) in automotive applications has significantly enhanced ICE performance by optimizing fuel delivery processes, taking into account a wide range of influencing factors.

In modern engines, the delivery of liquid or gaseous fuel into the cylinders is performed mechanically under the control of MPCS, primarily by spraying through valve-type injectors. These injectors are connected to a fuel accumulator where pressure is maintained at a constant level. Preliminary compression of the fuel provides the jet with sufficient mechanical energy to ensure proper spray direction and droplet dispersion—essential for effective mixture formation. At this stage, energy and material exchange occurs in the fuel delivery system through the transfer of a fuel mass that carries chemical energy. The mechanical energy imparted to the fuel jet improves the quality of mixture formation and combustion. Fuel pressure in the accumulator can be adjusted according to engine operating conditions. Additionally, electronic control of injector valves enables precise regulation of injection timing and duration.

MPCS serves as a technical means of establishing informational links for managing energy flows within the fuel system. It collects and processes data from various sensors and utilizes information obtained through mathematical and physical modeling during engine testing and calibration. The controller processes this data—stored in the form of extensive lookup tables—and converts it into control signals directed to the injectors. The information carrier within the system is an electrical signal, and power is supplied from the vehicle's onboard electrical network. The low-power signal generated by the MPCS is amplified in the output driver stage and then sent to the actuator, which includes an electromechanical converter located within the injector. This converter transforms a portion of the electrical energy from the onboard network into mechanical action on the controlled energy flow.

The adoption of MPCS has greatly expanded the potential for implementing complex control algorithms, allowing for the consideration of numerous parameters and more efficient management of energy processes. The amount of electrical energy consumed by the actuator depends on the resistance of the operating medium, as well as the inertia and velocity of the actuator's moving elements. In many

applications, there is a need to achieve both high mechanical force and rapid response time from the electromechanical converter.

Injectors equipped with electromechanical converters that directly actuate the valve (needle) are referred to as electromechanical injectors. In most known designs, valve closure is achieved using a spring, with the needle rigidly connected to the moving part of the actuator. The cyclic fuel delivery in such injectors is determined by the duration of the actuator's activation and the fuel pressure at the injector inlet.

The electromechanical converter functions as the interface between the electrical control system and the mechanical valve of the injector. Its operation is based on the principle of converting electrical energy into mechanical energy. According to their operating principles, electromechanical converters are categorized as electromagnetic, electrodynamic, magnetostrictive, and piezoelectric. Electromagnetic and electrodynamic converters rely on the interaction of externally generated magnetic fields, while magnetostrictive

and piezoelectric types utilize the intrinsic physical properties of materials and their crystalline structures, which respond to magnetic or electric fields.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

Modern research highlights the significant impact of microprocessor-based control systems on improving the efficiency of internal combustion engines (ICE). As shown in [1], the use of predictive control enables real-time adaptation of fuel supply parameters, enhancing fuel economy and reducing harmful emissions. Other studies [2, 3] examine the structure of ignition and fuel injection control systems, focusing on the precision of fuel volume and injection timing regulation. Special attention is given to injectors with electromechanical drives, where the pulse duration and fuel pressure directly determine the injection cycle. The authors of [4, 5] emphasize that the performance of an injector largely depends on the design of the electromechanical transducer, particularly its inertial characteristics and energy consumption, which are critical under high-speed operation.

One of the most well-known electromechanical transducers – due to its efficiency, simplicity, and long history – is the electromagnetic transducer, which utilizes the electromagnetic interaction forces of magnetic fields generated by the electromagnet coil within the ferromagnetic cores of the stationary magnetic circuit and the moving armature.

The high efficiency of electromagnetic devices is due to the presence of ferromagnetic materials in the magnetic system with a significantly higher relative magnetic permeability than that of air. The influence of ferromagnetic masses reduces the magnetic resistance of the environment surrounding the energized coil, thereby increasing the magnetic flux. A characteristic feature of electromagnetic interaction forces is their independence from the direction of the magnetic flux and thus the current direction in the control coil. Consequently, electromagnetic energy transducers have a unidirectional characteristic, meaning they operate only in one direction.

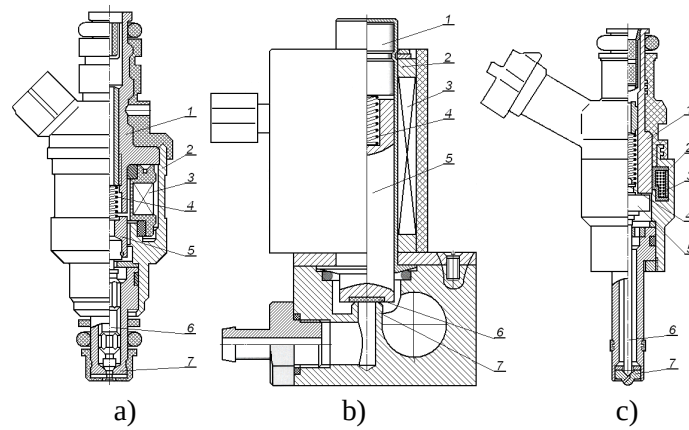
This type of injector, featuring an electromagnetic drive, has become widespread in spark-ignition engines. Below are the designs of injectors used for delivering gasoline, compressed natural gas (CNG), and liquefied petroleum gas (LPG).

Figure 1a shows the design of a Bosch injector, which is widely used in distributed gasoline injection systems in intake manifolds.

Injectors used by the Volkswagen Group for gasoline injection into the combustion chamber (Fig. 1c) differ from the previous ones by their elongated nozzle tip, adapted for harsher temperature conditions, as well as by the shape of the magnetic circuit and the number of turns in the electromagnet coil. This is because direct gasoline injection is time-constrained, requiring a faster-acting electromechanical transducer.

Injectors for delivering LPG or CNG (Fig. 1b) significantly differ from the previous two designs in terms of the shape of the electromagnet components, valve construction, and the direct placement of the injectors on the fuel rail.

However, a common feature of all the above injector types is the presence of electromechanical transducer elements: a ferromagnetic magnetic circuit encompassing the coil and a movable armature. That is, they are all direct-action electromechanical devices with an electromagnetic drive.



1 – inner magnetic circuit; 2 – outer magnetic circuit; 3 – electromagnet coil; 4 – spring;
5 – electromagnet armature; 6 – injector valve (needle); 7 – valve seat (sealing surface)

Fig. 1. Designs of injectors for gasoline and gas delivery

The main advantage of electromagnetic fuel injectors (EMFIs) lies in their structural simplicity, while a significant drawback is the delay in the needle valve opening due to the operation of the electromechanical transducer.

OBJECTIVE AND PROBLEM STATEMENT

The objective of this study is to reduce the labor intensity and increase the informativeness of diagnostics for electromagnetic injectors in distributed injection systems of gasoline and gas-powered passenger vehicles under operating conditions, by using a developed method for measuring the injector valve's open state duration τ_{inj} . (method for recording the movement of the valve or armature).

RESEARCH RESULTS

In almost all systems, the basis of the injector control algorithm is the model for determining the cyclic supply:

$$G_{cf} = g_{st} \cdot \tau_d, (1)$$

where g_{st} – static nozzle performance, τ_k – duration of the control pulse supplied to the injector. Under static nozzle performance g_{st} understand its ability to pass the amount of fuel G_f with a constantly open valve for a certain period of time τ_d .

From Fig. 2 it is seen that the valve motion diagram has a shape close to a trapezoid. According to formula (1), the cyclic flow is defined as the area of a rectangle with height g_{st} and width τ_d

Error in determining the cyclic feed:

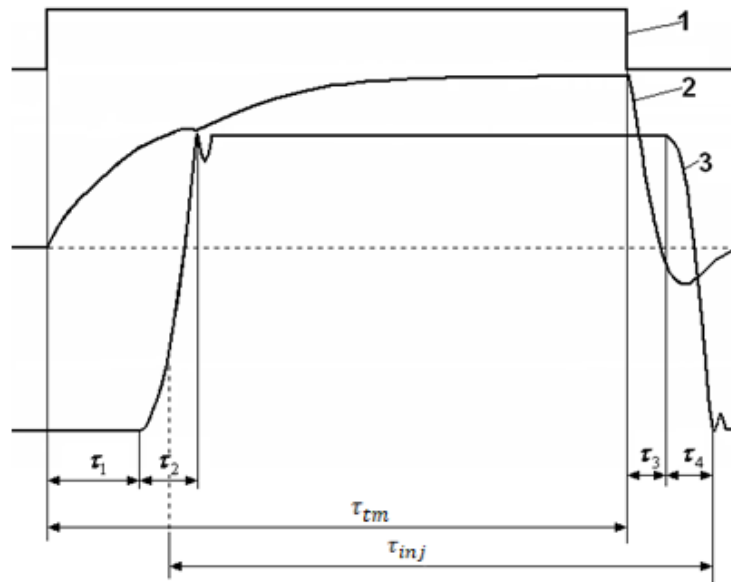
$$\frac{\Delta G_{cf}}{G_{cf}} = \frac{\Delta g_{st}}{g_{st}} + \frac{\Delta \tau_d}{\tau_d}, (2)$$

where $\frac{\Delta G_{cf}}{G_{cf}}$, $\frac{\Delta g_{st}}{g_{st}}$ та $\frac{\Delta \tau_d}{\tau_d}$ – relative errors of cyclic delivery, static nozzle performance and control pulse duration.

The following is obvious: firstly, g_{st} differs in different injectors due to technological inaccuracies and changes in operation due to contamination; secondly, as can be seen from Fig. 2, the duration of the open state of the injector valve τ_{inj} differs from the duration of the electric control pulse τ_d supplied to the injector electromagnet winding by the amount of valve flight delay during lift-off and landing:

$$\tau_{inj} = \tau_d - (\tau_1 + 0,5\tau_2) + (\tau_3 + \tau_4). (3)$$

In the formula (3) τ_1 – time spent overcoming spring resistance and fuel pressure; τ_2 – time spent overcoming the resistance force of the spring, the friction force, the inertia of the valve and the armature of the electromagnet during direct flight; τ_3 – the time during which the accumulated force of the electromagnet will decrease so much that the force of the spring and fuel pressure will exceed it and the return movement of the armature will begin; τ_4 – time spent overcoming friction, valve inertia and solenoid armature during landing.



1 – control signal; 2 – current strength in the electromagnet coil; 3 – motion diagram of the electromagnet armature (injector valve)

Fig. 2. Oscillogram of processes in the electromagnetic actuator of the injector valve

Formula (3) can also be presented in another form:

$$\tau_{inj} = \tau_d - \Delta\tau_{dis} \quad (4)$$

where $\Delta\tau_{dis}$ – takes into account the discrepancy between the control pulse τ_d and the real injection time τ_{inj} and is determined from the formula:

$$\Delta\tau_{dis} = (\tau_1 + 0,5\tau_2) - (\tau_3 + \tau_4). \quad (5)$$

Sometimes it is more convenient to use the correction factor k_τ , which takes into account the delay in the operation of the injectors. It can be determined from the formula:

$$k_\tau = 1 - \frac{\Delta\tau_{dis}}{\tau_d}. \quad (6)$$

The condition for the start of movement of the electromagnet armature is the excess of the electromagnet force over the resistance forces acting in the opposite direction:

$$F_p \geq F_{np} + F_{mp} + F_n, \quad (7)$$

where F_p – electromagnet force, F_f – spring force, F_{fr} – friction force, F_{fp} – force from fuel pressure.

The magnitude of the force of the electromagnetic drive is determined by the formula:

$$F_p = \left[\frac{U}{R_c} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \right]^2 \cdot \omega^2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot \frac{1}{2\delta^2}, \quad (8)$$

where U – coil voltage; R_c – coil resistance; ω – number of turns in the coil; μ_0 – absolute magnetic permeability of vacuum; S – cross-sectional area of the magnetic core; δ – magnetic gap in a magnetic circuit; t – current time; T – the time constant of the electromagnet coil, which is determined from the formula:

$$T = \frac{L}{R_c}, \quad (9)$$

where L – coil inductance.

As shown by formulas (2), (3), (4), (5) and (6), the time components that cause the displacement of τ_{inj} relative to τ_d in this process involve certain factors that partially depend on the manufacturing technology and can also change over time and depending on operating conditions. The gaps between the pre-tension pairs become dirty, the surfaces in the contact points of the spring and the injector valve wear out, the gap between them and, accordingly, the spring force changes; due to the aging of the materials, shrinkage occurs and the spring stiffness, supply voltage, resistance and inductance of the electromagnet coil change.

When equipping the engine with injectors, it is necessary to ensure that the kit contains injectors in which the time intervals $\tau_1 \dots \tau_4$ differ by no more than 5%. This is especially true when converting a gasoline engine to operate on gas fuel, because the characteristics of gas injectors are significantly different from gasoline ones.

To establish the difference between injectors by the characteristic τ_{inj} , several methods can be used:

- the method of spilling in dynamic mode;
- the method of registering the movement of the valve or armature;
- the method of registering the movement of the fuel jet.

Each of the above methods has its own disadvantages and advantages.

For example, the spill method is universal for nozzles of any design used for liquid fuel injection. It is difficult to measure the amount of gas supplied separately by each nozzle. In addition, the specified method allows you to detect only the difference in the amount of fuel supplied between nozzles and is not able to find out the difference in all delay time intervals from τ_1 to τ_4 .

The method of registering the movement of the valve or armature allows you to obtain in detail all the delay time intervals $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$. But it can be applied only to those nozzles whose design allows the registration of the movement of the valve or armature.

The method of registering the movement of the fuel jet can be applied only to liquid fuel injection nozzles.

The paper proposes a method of registering the movement of the valve or armature, which can be applied to the nozzles shown in Fig. 1 a and 1 b.

The experiments were carried out on a laboratory model containing a serial gasoline injection nozzle as an object for determining dynamic characteristics, a control pulse generator and a set of converters and amplifiers that allow recording in the acquisition system the processes that occur in the electromagnetic actuator of the valve injector. The model consists of a power source and a monoblock containing an injector equipped with a current sensor and an optoelectronic valve displacement sensor, amplifiers for these sensors, a pulse generator with pulse frequency and duration regulators, a detachable connector for connecting the data acquisition system. This makes it possible to obtain an oscillogram of the processes (Fig. 2) that occur in the electromagnetic actuator, which cannot be implemented directly on the engine. The duration of all phases of the injector valve movement is determined from the oscillogram.

The following algorithm for conducting tests is proposed in the work:

1 Prepare the data acquisition system for operation: check the presence of grounding, turn on the power to the computer system unit, start the Power Graf program, select the number of channels for registration – 4, set the sampling frequency to 50 kHz in the "Frequency" window.

Assign names to the channels: 1 – control pulse, V; 2 – current strength, A; 3 – coil voltage, V; 4 – armature displacement, mm.

2 Turn on the power to the laboratory layout unit. Using the pulse frequency and duration regulators located on the layout, set the frequency and duration of the control pulses τ_d .

3 Record the processes in the nozzle by clicking the "Start" button in the Power Graf program menu. After 1 s, click the same button again.

4 Save a fragment of the test process to an individual file. The file name includes the student's last name, as well as information about the frequency and duration of the control pulse τ_d on the injector.

5 Perform data processing by determining the duration of the phases of movement of the electromagnet armature together with the injector needle: $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$, as shown in Fig. 2.

6 According to formula (3), determine the duration of the open state of the injector sprayer τ_{inj} , the discrepancy of the control pulse τ_d to the real injection time $\Delta\tau_{dis}$ according to formula (5), and the delay coefficient k_τ according to formula (6).

CONCLUSIONS

Phased injection provides equal conditions for mixture formation in all cylinders. But due to the technological spread of the injector characteristics, there is uneven fuel supply. If the set of injectors for the engine is selected with small deviations μf (for example 3%), and the delay time is approximately the same, then the unevenness of the supply of gasoline to the cylinders of the new engine is ensured within approximately the same limits.

Changing the static and dynamic characteristics of the injectors during operation significantly affects the unevenness of the fuel supply. Changing the cross-section of the spray holes affects the overall performance of the injectors. The difference in the delay of the injector valves by 0.1 ms leads to an increase in unevenness in low-flow modes by 2 ... 2.5 times.

The described method for determining the energy performance of a vehicle can be used for work on determining fuel consumption on vehicles equipped with distributed fuel injection systems, as well as for determining or clarifying the basic norms of consumption for transport work, taking into account the operating conditions. elements of the fuel injection system.

REFERENCES

1. Dhananjay, S., & Bansal, R. K. (2021). Model predictive control of internal combustion engines: A review. *Energies*, 14(19), 6251. <https://doi.org/10.3390/en14196251>
2. Bianchi, G., Corcione, F. E., & Valentino, G. (2017). A review on control system architecture of a SI engine management. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.031>
3. Zhao, F., & Lai, M.-C. (2013). Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 667–684. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.014>
4. Lisowski, E., & Szczepanek, T. (2023). Injected fuel mass and flow rate control in internal combustion engines. *Energies*, 17(24), 6455. <https://doi.org/10.3390/en17246455>
5. Adegboyega, A., & Oyelami, O. (2014). Electronic control of fuel mixture preparation and injection in internal combustion engines. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(7), 199–204. <https://doi.org/10.12691/ajme-2-7-126>
6. Internal combustion engines: A series of textbooks in 6 volumes. T. 3. Computer control systems of internal combustion engines. / Edited by A.P. Marchenko, Honored Scientist of Ukraine, Prof. A.F. Shekhovtsov – Kharkiv: Publishing center of NTU “KhPI”, 2004. 427 p.

Горбик Ю.В. Метод визначення динамічних характеристик паливних форсунок з електромагнітними приводами клапанів

Сучасні паливні форсунки з електромагнітними приводами є критичними компонентами систем живлення двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), від яких залежить точність дозування палива, ефективність згоряння суміші та екологічні показники двигуна. Динамічні характеристики форсунок, такі як швидкість спрацьовування, стабільність циклової подачі та відповідність керуючим сигналам, безпосередньо впливають на якість роботи двигуна. Проте з часом їхні параметри погіршуються через знос, забруднення або деградацію матеріалів, що призводить до збільшення викидів шкідливих речовин, зростання витрати палива та зниження потужності. У статті запропоновано метод діагностики динамічних характеристик форсунок який можливо використовувати без їх демонтажу, або з демонтажем, що дозволяє виявляти відхилення на ранніх етапах та оптимізувати процеси технічного обслуговування, а також зменшити трудомісткість технічного обслуговування. Також запропоновано методику доцільно використовувати у навчальному процесі для підготовки фахівців спеціальності 274 «Автомобільний транспорт».

Перевірка форсунок здійснюється шляхом порівняльного аналізу показників усіх форсунок двигуна. До цих параметрів відносяться корекція циклової подачі пального, характеристики керуючого сигналу, опір форсунки, час затримки відкриття голки форсунки при спрацьовуванні електромеханічного перетворювача. Для визначення стану форсунки необхідно встановити значення всіх діагностичних параметрів. Відхилення хоча б одного з них від номінального значення свідчить про несправність або забруднення перевірюваної форсунки. Запропоновано метод визначення динамічних характеристик паливних форсунок з електромагнітними приводами клапанів.

Ключові слова: мікропроцесорні системи керування, електромеханічний перетворювач, клапани форсунок, соленоїд клапанів, метод реєстрації руху клапана або якоря.

ГОРБІК Юрій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: yuragorbik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6876-8428.

Yurij GORBIK, Associate Professor (Assoc. Prof.), Candidate of Science in Engineering (Ph. D. (Eng.)), Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU), e-mail: yuragorbik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6876-8428.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1705

Hnyp M.M.
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ENERGY-ECONOMIC RESULTS OF USING THE METHOD OF REDUCING ENERGY LOSSES OF MOBILE DIESEL COMPRESSOR STATIONS BY ADDITIONAL COOLING OF COMPRESSED GASES

The article conducts experimental studies of the use of additional freon cooling systems instead of water systems, which allows reducing the specific consumption of the coolant per kilogram of cooled gas by 2-3 times. For example, for the compressor unit KPU-16/250 the specific consumption of the heat carrier per kilogram of cooled gas when pumping nitrogen for the operating cooling system will be 1.71 kg/kg, and for the designed freon system - 0.69 kg/kg; the specific consumption of the heat carrier per kilogram of cooled gas when pumping air for the operating cooling system will be 1.76 kg/kg, and for the designed freon system – 0.72 kg/kg;

When using additional freon systems of high-efficiency cooling for cooling compressed air with a decrease in the temperature of the working medium in gas coolers to -10 °C, the specific energy consumed by the compressor is reduced for diesel compressor units of the oil and gas industry, on average, by 14-17%. Thus, for the SD-9/101M compressor unit, when nitrogen is injected, the specific energy consumed by the compressor decreases from 315.21 kJ/kg to 263.34 kJ/kg or by 16.5%; when air is injected, the specific energy consumed by the compressor decreases from 320.74 kJ/kg to 275.46 kJ/kg or by 14.2%.

Keywords: energy efficiency, compressor, cooling system, energy, power.

INTRODUCTION

Currently, manufacturers and researchers are developing promising energy saving directions in compressor units, for example, by reducing leaks, optimizing output pressure, choosing the right control and management systems, etc. But it is obvious that the greatest reserve of energy saving of mobile diesel compressor stations will be the effective recovery of thermal energy, which is carried out with exhaust gases and thermal energy of compressed gases, which is released into the environment. Thermal energy, which is transferred through the cooling system to the environment, is of low potential, the efficiency of its use is relatively low, but further use of thermal energy, which is transferred through the cooling system to the environment, is also advisable.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The main directions for reducing the energy consumption of mobile diesel compressor stations are [1]:

- efficient use of heat from the working process;
- improvement of the design of the compressor and its compressed gas preparation and release systems, primarily its compressed gas cooling system;
- reduction of fuel costs for the compressor (switching to cheaper alternative fuels: pyrolysis, biogas, methane, etc.);
- improvement of the compressor drive engine (switching to improved electronic fuel injection systems, multi-valve cylinder heads, increasing turbine pressure, etc.)

Let's take a closer look at the first direction.

In modern diesel engines, approximately 35-40% of the total amount of thermal energy introduced into the engine with fuel goes to perform useful work, approximately 25-30% of the energy is removed with exhaust gases and 30-35% is transferred through the cooling system to the environment [2].

As for the use of thermal energy carried away with exhaust gases and thermal energy of compressed gases released into the environment, the most effective device for heat utilization for mobile technological installations will be a thermoelectric generator [3]. Modern thermoelectric generators are reliable semiconductor devices, and the efficiency of modern thermoelectric generators with a temperature difference of more than 100 °C already reaches 20%. Even when using only 10% of thermal energy, about 3% will be saved on the heat carried away with exhaust gases, and about 2% on the thermal energy of compressed gases from the total amount of thermal energy introduced into the engine with fuel.

In other words, in the overall heat balance, where in modern diesel engines approximately 35-40% of the total amount of thermal energy introduced into the engine with fuel goes to perform useful work, about 5% of the energy of the overall heat balance of the engine can be converted into electrical energy.

A well-known method of reducing energy consumption, in terms of improving the design of the compressor, is to reduce energy losses due to friction in the elements of the compressor station, as well as to reduce total pressure losses during gas movement in the inlet and outlet pipes.

Regulating the gas compression pressure is a fairly effective method of saving energy. It has been found that reducing the output pressure by every 10 kPa reduces the compressor's energy consumption by 1-2% [4].

For the efficient operation of the compressor station, it is also rational to increase the compressor load and organize the operation of the equipment in energy-efficient modes. Such optimization of the compressor operating mode allows reducing energy consumption by 2-3% [4].

Thus, from the point of view of maximum energy saving of mobile diesel compressor stations, the most effective direction will be the use of thermal energy of compressed gases and heat, which is carried out with exhaust gases, with the conversion of this thermal energy into electrical energy.

It has been analyzed that for mobile diesel compressor stations, about 5% of the total heat balance energy can be converted into electrical energy, while in modern diesel engines, about 35-40% of the total amount of thermal energy introduced into the engine with fuel is used to perform useful work. In other words, through the effective use of excess heat, an additional amount of electricity can be obtained within 12-14% of the nominal effective engine power.

But at the same time, another problem arises - the effective use of the received electricity. The capacity of the own systems of electric energy consumption and energy supply for existing engines and technological installations as a whole is much smaller. For example, the capacity of electric generators of existing internal combustion engines is about 1% of the nominal effective power of the engine. Therefore, it will not be rational to use the received electricity only to meet the own electric energy needs of the engine [5]. Therefore, the problem of using excess electricity within 12-14% of the nominal effective power of the engine requires a different solution.

As has already been established, the energy efficiency and cost-effectiveness of compressor stations are significantly related to the removal of heat from gas compression. In addition, the process of gas compression in compressor plants is accompanied by a significant increase in temperature, which, when the pressure increases, can reach more than 200 °C and worsen the operation of compressor units, including the risk of explosion in compressors due to ignition of oil vapors [6].

Therefore, it follows from the above that for energy-efficient operation of the compressor, it is necessary to additionally artificially cool the compressed gas during its operation without increasing the area of the cooling heat exchangers.

The most economical cooling is achieved by increasing the water temperature in the heat exchanger by 15-20 °C. It is not recommended to heat the water above 40 °C, since at higher temperatures salts are released on the heat exchange surfaces [7].

Thus, for energy-efficient operation of the compressor, it is necessary to artificially cool the compressed gas during its operation. The efficiency of cooling the compressed gas in the intermediate and final coolers directly affects the specific compression costs, and therefore the lower the temperature of the compressed gas in the intermediate coolers, the higher the energy efficiency of the compressor unit.

Given the low efficiency of air and water cooling and water injection cooling, the most effective is to cool compressed gases in closed intercooling systems with a coolant other than water.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The aim of the work is to conduct experimental studies of the energy and economic results of the method of reducing energy losses of mobile diesel compressor stations through additional highly efficient cooling of compressed gases.

The scientific and technical tasks are as follows:

- study of potential directions of energy efficiency of mobile diesel compressor stations;
- analysis of directions of energy saving of mobile diesel compressor stations by improving the compressed gas cooling system and by using the heat of compressed gases;
- assessment of energy efficiency of the proposed methods of increasing energy saving.

RESEARCH RESULTS

As it was established, to achieve minimum energy consumption of mobile diesel compressor stations, it is necessary to ensure the deepest possible cooling of compressed gas in the heat exchangers of the intercooling system.

This is explained by the fact that the decrease in gas temperature before each stage of the compressor increases the gas density. At the same time, in direct proportion to the increase in gas density in the

cylinders, the compressor performance increases. Calculations show that a decrease in gas temperature by 1 K leads to an increase in performance by approximately 0.3% [8]. Thus, with a decrease in the temperature of the sucked gas, the specific energy consumption for the compressor drive decreases proportionally, and the most efficient from an energy point of view is the process of isothermal gas compression in the compressor. But the implementation of isothermal gas compression is possible only due to the maximum increase in the areas of cooling heat exchangers. This, in turn, will lead to an increase in pressure and energy losses. At the same time, in existing compressors, on average, from 5 to 10% of the gas compression power is spent on overcoming losses in gas coolers.

Research into a promising system for highly efficient cooling of compressed gas in compressor stations was carried out on a specially designed and manufactured experimental stand with an evaporator, two compressed air circuits, and air cooling and heating units (Fig. 1). Two identical CO-7B compressors were used to pump gas (Fig. 2). The air in the gas cooler circuit was cooled using an Electrolux mobile air conditioner.



1 – air heating unit; 2 – stand frame; 3 – control panel; 4 – gas cooler damper control compressor;
5 – gas cooler-evaporator;

Figure 1 – Installation with a system of highly efficient compressed gas cooling of compressor stations



Figure 2 – Compressor SO-7B

To determine the energy consumption for gas pumping, gas flow and pressure data were used. Pressure measurements were performed using a manometric manifold (Fig. 3), and the flow rate of pumped gases was measured using a gas meter (Fig. 4).

When conducting experimental studies of the proposed scheme for energy saving of compressors due to highly efficient additional cooling of compressed gas, the energy losses of the compressor were determined. For this purpose, two identical compressors CO-7Б were used, which created two air injection circuits. The first compressor pumps air into the gas cooler, the second pumps cooled air. The maximum compression ratio ε of the compressors can be 6 units. When conducting experimental studies, the

compression ratio ε of the compressors was limited to 3 units. The air in the gas cooler circuit is cooled using a mobile Electrolux air conditioner. The air conditioner operates in two modes: in the first, it supplies ordinary uncooled air from the environment (simulation of the operation of existing compressor stations in the oil and gas industry), in the second, it supplies cooled air (simulation of the operation of a promising scheme for highly efficient additional cooling of compressed air).



Fig. 3. Manometric manifold for measuring the compressed gas pressure of the installation



Fig. 4. Flowmeter for measuring volumetric flow of compressed gas

The energy consumption per unit time of each circuit was determined by the corresponding transformation of the formula 1.

$$L_e = \frac{k}{k-1} \cdot P_{i1} \cdot V_{i1} \cdot \left(\left(\frac{P_{i2}}{P_{i1}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \text{ MJ/h.} \quad (1)$$

where P_{i1} – pressure at the inlet of the i-th circuit, Pa;

P_{i2} – pressure at the outlet of the i-th circuit, Pa;

V_{i1} – compressor capacity at the inlet of the i-th circuit, m^3 .

The outlet pressure of each stage P_2 was determined from formula 2 through the inlet pressure and gas temperatures at the inlet T_1 and outlet of each circuit T_2 .

$$P_2 = P_1 \cdot 2^{\sqrt{\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^7}}. \quad (2)$$

Initially, experimental studies were conducted and the specific work of compression was determined for existing compressor units for different seasons without cooling and with artificial cooling from ambient air. This is necessary to assess the efficiency of standard compressed air-cooling systems. The results of experiments and calculations are shown in the figure 5.

From the results of the performed experimental studies, the following conclusions can be drawn:

- the lower the ambient temperature, the lower the specific work of compression of the compressor.

For example, the specific work of compression of the second circuit at an ambient temperature of -5 °C is 97.1 kJ/kg, +5 °C – 104.2 kJ/kg, +35 °C – 111.6 kJ/kg;

- the higher the ambient temperature, the worse the cooling of the compressor and the higher the specific work of compression of the compressor. For example, the specific work of compression of the second circuit at an ambient temperature of $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and forced cooling is 67.9 kJ/kg (69.9%), and at $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 87.5 kJ/kg (78.4%);

- with increasing ambient temperature, the useful power consumption of the compressor also increases, for example, from 82.9% at an ambient temperature of $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ to 86.7% at an ambient temperature of $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- cooling of compressed air, which is used at existing compressor stations, is an effective way to reduce the specific work of compression of the compressor. In this case, the range of reduction in the specific work of compression of the compressor varies within 69-78%.

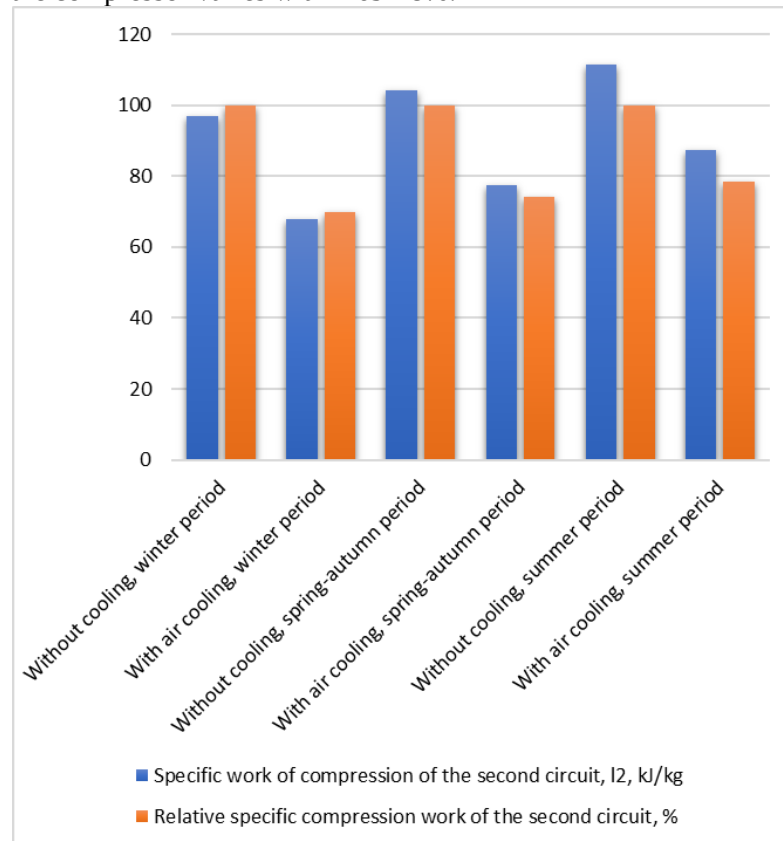


Fig. 5. Results of experimental studies of cooling schemes of existing compressor units

Further, experimental studies of the proposed scheme for energy saving of compressors due to highly efficient additional cooling of compressed gas were carried out and compared with the existing cooling scheme. During the experiments, the power consumed by the freon compressor was limited to a value that was 5% of the power of the main compressor.

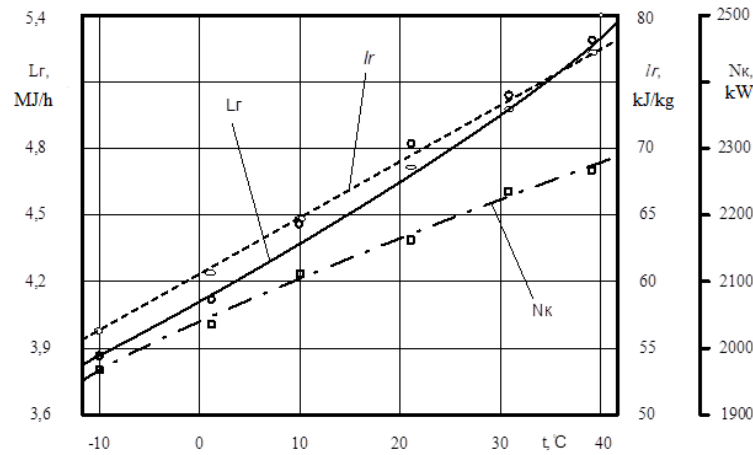
The results of experimental studies of hourly energy consumption, specific compression work and total useful power of compressors depending on the temperatures at the inlet to the gas cooler circuits are shown in Fig. 6.

From the results of the experimental studies of the proposed scheme for energy saving of compressors due to highly efficient additional cooling of compressed gas, the following conclusions can be drawn:

- compressed air cooling due to highly efficient additional cooling of compressed gas of the proposed compressor energy saving scheme is an effective way to reduce the specific work of compression of the compressor. In this case, the maximum value of the reduction in the specific work of compression of the compressor reaches 72.7%;

- the lower the temperature of the gas cooler, the lower the specific work of compression of the compressor. For example, the specific work of compression of the second circuit at a gas cooler temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 56.2 kJ/kg , $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 60.4 kJ/kg , $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 68.9 kJ/kg ;

- compressed air cooling due to highly efficient additional cooling of compressed gas of the proposed compressor energy saving scheme allows to reduce the total useful power of the compressor to 14.5%.



L_2 - hourly energy consumption for the second circuit, MJ/h;;

l_2 - specific work of compression of the second circuit, kJ/kg;

N_{kc} - total useful power of the compressor, kW

Fig. 6. Dependence of hourly energy consumption L_2 , specific work of compression l_2 and total useful power of compressors N_{kc} on temperatures t at the inlet to the gas cooler circuits

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

The results of theoretical and experimental studies have shown that the greatest energy saving reserve for mobile diesel compressor units in the oil and gas industry is realized with the deepest possible cooling of compressed gas in the heat exchangers of the intercooling system due to the recovery of excess heat.

This is explained by the fact that a decrease in gas temperature before each compressor stage increases gas density. At the same time, in direct proportion to the decrease in gas temperature in the cylinders, compressor performance increases and energy consumption decreases. Calculations show that a decrease in gas temperature by 1 K leads to an increase in performance and a decrease in energy consumption by approximately 0.3%.

To assess the energy efficiency of the proposed methods for increasing energy saving based on the results of theoretical and experimental studies, energy efficiency calculations were performed for the most common typical mobile diesel compressor stations in the oil and gas industry for the existing and proposed gas cooling systems when using different types of gases. The design season is autumn-spring, the ambient temperature is 15 °C, the working fluids are air and nitrogen.

The results of calculations of the main energy efficiency indicators of mobile diesel compressor stations in the oil and gas industry during air injection are shown in Fig. 7,8.

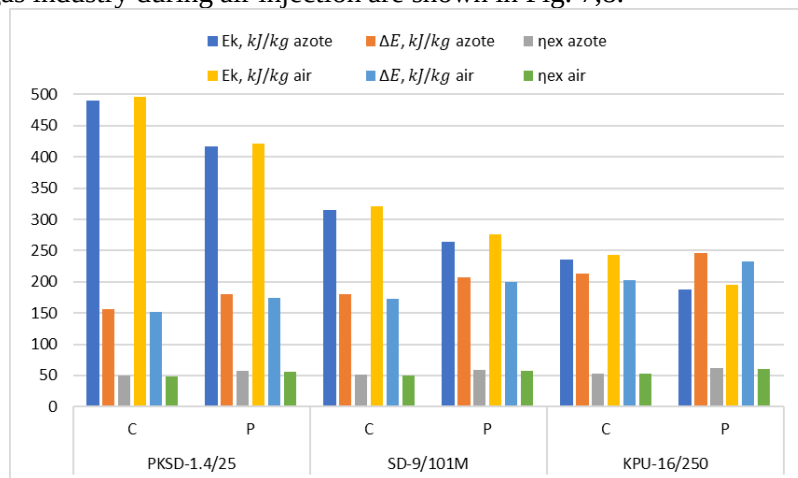


Fig. 7. Energy efficiency calculations for common mobile diesel compressor stations in the oil and gas industry for air injection

In Figure 7, the following notations are used:

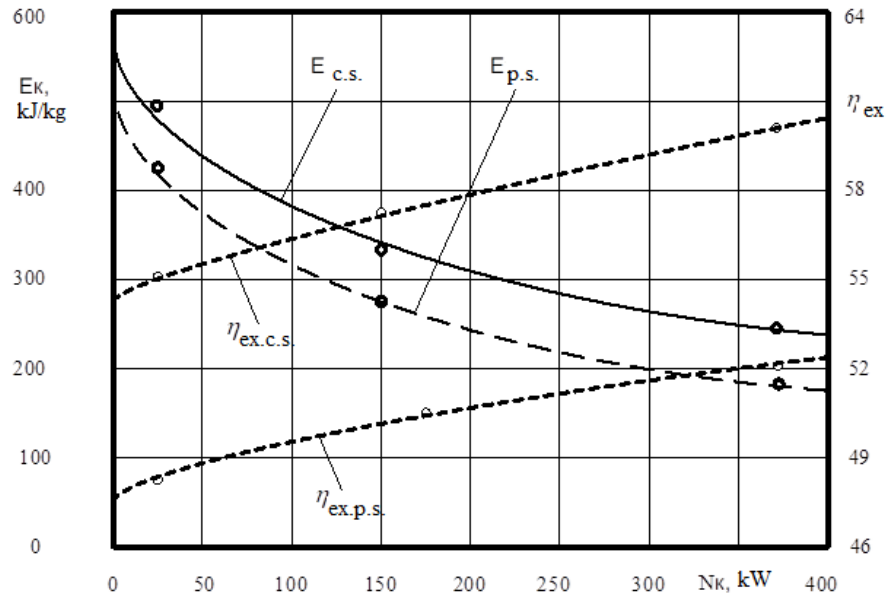
C – the current existing cooling system of compressed gases;

P – proposed additional compressed gas cooling system;

E_k – specific energy consumed by the compressor, kJ/kg;

$\Delta E_{cm,z}$ – change in exergy of compressed gas, kJ/kg;

$\eta_{екс}$ – exergy efficiency.



$E_{к.д}$ – specific energy consumed by compressors according to the current scheme, kJ/kg; $E_{к.п}$ – specific energy consumed by compressors according to the proposed scheme, kJ/kg; $\eta_{екс.д}$ – exergy efficiency according to the current scheme; $\eta_{екс.п}$ – exergy efficiency according to the proposed scheme

Fig. 8. Results of calculations of the main indicators of energy efficiency of mobile diesel compressor stations in the oil and gas industry when pumping air

CONCLUSIONS

Based on the calculations and results obtained, the following conclusions can be drawn:

The more stages, the more intermediate cooling circuits and the higher the energy savings for compressor stations when using additional high-efficiency freon cooling systems for compressed gas.

At low compressor pressure stages (one to two), it is not advisable to use advanced gas cooling systems with freon, since the energy savings are not very significant.

At high compressor pressure stages (three and more), it is already advisable to use advanced gas cooling systems with freon. In this case, an increase in the number of compression stages leads to an increase in the energy efficiency index.

The highest energy efficiency is achieved when compressing gases with a lower molar mass. Thus, the energy efficiency when compressing nitrogen gases is higher than when compressing air. For example, the specific energy consumed by the compressor for the PKSD-1.4/25 installation when pumping nitrogen is 490.22 kJ/kg for existing cooling systems and 416.55 kJ/kg when using additional freon systems of high-efficiency cooling; when pumping air for existing cooling systems 495.93 kJ/kg and 420.76 kJ/kg when using additional freon systems of high-efficiency cooling;

The exergy efficiency of compressor units tends to increase with increasing absolute power. Thus, for the PKSD-1.4/25 compressor unit with a capacity of 23 kW, the exergy efficiency when pumping air is 48.2%, and for the KPU-16/250 compressor unit with a capacity of 368 kW, the exergy efficiency is 52.1%; When using additional freon systems of high-efficiency cooling for compressed air cooling with a decrease in the temperature of the working medium in gas coolers to -10 °C, the exergy efficiency of the compressors increases by approximately 15%. For example, for the PKSD-1.4/25 compressor unit, the exergy efficiency increases from 48.2 to 55.2%, for the SD-9/101M compressor unit, the exergy efficiency increases from 51.0 to 58.7%, for the KPU-16/250 compressor unit, the exergy efficiency increases from 53.2 to 61.3%;

When using additional freon systems of high-efficiency cooling for compressed gas cooling with a decrease in the temperature of the working medium in gas coolers to -10 °C, the specific heat transfer

coefficient of heat exchangers - compressed gas coolers - decreases, on average, by 25%. Thus, for the compressor unit SD-9/101M, when nitrogen is injected, the specific area of heat exchangers decreases from 5.201 m²/kg to 3.894 m²/kg; when air is injected, the specific area of heat exchangers decreases from 4.434 m²/kg to 3.327 m²/kg;

REFERENCES

1. Kryshchtopa, S. I. ., Kryshchtopa, L. I., Hnyp M. M., Mykytiy, I. M. ., & Tseber, M. M. . (2020). Development of energy efficient system of gas cooling of mobile diesel compressor stations of oil and gas industry. *Oil and Gas Power Engineering*, (1(33)), 81–89.
2. Anisimov V.F., Dmytriieva A.V., Sevostianov S.M. *Teplovyi ta dynamichniy rozrakhunok avtomobilnykh dvyhuniv. Navchalnyi posibnyk.* - Vinnytsia: VNTU, 2008 – 125 s.
3. Kryshchtopa S.I., Kryshchtopa L. I., Prunko I. B., Melnyk V. M., Hnyp M. M. Eksperymentalni doslidzhennia metalopolimernykh par tertia z vrakhuvanniam tryboelektrychnykh protsesiv. *Problemy trybolohii*. 2016. 4. S. 55–60.
4. Enerhozberezhennia. Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymohy ta nastanova shchodo vykorystannia: DSTU ISO50001:2014. – K.: Minekonomrozyvtyku Ukrainy, 2014. 26 s.
5. Safaei H., Keith D., Hugo R. Compressed air energy storage (CAES) with compressors distributed at heat loads to enable waste heat utilization. *Applied Energy*. 2013. Vol. 103. P. 165-179.
6. Xiaolin T., Shougen. H., Hongbo Q., Jun Z., Lin R. Energy Consumption and Energy Saving Research Status of Air Compressor System. *Applied Mechanics & Materials*. 2014. Vol. 628. R. 225-228.
7. Zhang B. Optimization of an Industrial Air Compressor System. *Energy Engineering*. 2013. Vol. 110, Issue 6. P. 52-64.
8. Wettstein Hans E. The Semiclosed Recuperated Cycle With Intercooled Compressors. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*. 2015. Vol. 137, Issue 3. P. 1-11.

Гнип М.М. Енерго-економічні результати використання методу зниження втрат енергії пересувних дизельних компресорних станцій шляхом додаткового охолодження стиснених газів

У статті проведено експериментальні дослідження використання додаткових фреонових систем охолодження замість водяних систем, що дозволяє в 2-3 рази знизити питому витрату охолоджувача-теплоносія на один кілограм охолодженого газу. Наприклад, для компресорної установки КПУ-16/250 питома витрата теплоносія на один кілограм охолодженого газу при прокачуванні азоту для діючої системи охолодження складе 1,71 кг/кг, а для проекрованої фреонової - 0,69 кг/кг; питома витрата теплоносія на один кілограм охолодженого газу при прокачуванні повітря для діючої системи охолодження складе 1,76 кг/кг, а для проекрованої фреонової – 0,72 кг/кг;

При використанні для охолодження стисненого повітря додаткових фреонових систем високоефективного охолодження зі зниженням температури робочого тіла в газоохолоджувачах до - 10 °С питома енергія, що споживається компресором, знижується для дизельних компресорних установок нафтогазової галузі, в середньому, на 14-17 %. Так, для компресорної установки СД-9/101М при нагнітанні азоту питома енергія, що споживається компресором, зменшується з 315,21 кДж/кг до 263,34 кДж/кг або на 16,5 %; при нагнітанні повітря питома енергія, що споживається компресором, зменшується з 320,74 кДж/кг до 275,46 кДж/кг або на 14,2 %.

ГНИП Марія Михайлівна, доктор філософії, доцент, кафедра автомобільного транспорту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, E-mail: marichka_gnip@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3662-0941>

HNYP Mariia, PhD, Department of Automobile Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, E-mail: marichka_gnip@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3662-0941>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1706

УДК 656.11, 656.13
UDC 656.11, 656.13

Horbachov P., Svichynskyi S.
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

THE AVERAGE VEHICLE SPEED IN A DENSE TRAFFIC FLOW WITH TWO SLOW-MOVING VEHICLES ON A ROAD SECTION WITH LIMITED MANOEUVRING OPPORTUNITIES

The wide range of vehicle speed studies indicates considerable attention to speed as the parameter of traffic flow that affects traffic safety and comfort, the environment, and the quality of life. This parameter is also one of the most important in transport modelling, where the speed distribution law, its percentiles, and the mode and mean are used. Most of the literature presents the results of speed surveys on sections of interurban roads and urban arterial streets, where traffic flow is mostly free. It is common for these studies to consider normal distribution typical for vehicle free-flow speeds, as well as the possibility of using the percentiles of this distribution, its mode and mean value in practice. However, this is not the case with the results of studying the speed in urban traffic conditions complicated by dense traffic and limited manoeuvring opportunities. In such conditions, a much smaller number of studies have been conducted. They do not demonstrate a consensus on the possibility of using speed distribution, which could be considered reference one, but at the same time, they are consistent in indicating a tendency to the decrease in average speed and the shift of the distribution mode to the left compared to the case of free-flowing traffic. This paper presents the initial steps in studying speed in complicated urban traffic conditions characterised by a strong influence of vehicles on each other, which can be observed on road sections with a single traffic lane and without a possibility of overtaking. In this research, the formula for calculating the average speed of a vehicle platoon with one slow-moving vehicle is used to derive the analogous formula for the case of two slow-moving vehicles, which limit the speed of the others. These formulas allow for deepening the knowledge of the limiting effect of dense flow on vehicle speed and the first moment of speed distribution, as well as coming closer to obtaining a relationship to calculate average traffic flow speed with any number of slow-moving vehicles.

Keywords: traffic speed, average speed, traffic flow, flow density, traffic lane, traffic conditions, analytical modelling, transport system.

INTRODUCTION

Vehicle speed has a special place among the urban traffic flow (TF) parameters, and the corresponding attention of international institutions confirms the importance of studying it. To date, urban and rural traffic speed has been studied in many countries in the following context: The World Health Organisation presented the speed study in the Global Status Report on road safety [1]; The United Nations Economic Commission for Europe showed the importance of managing speed and its impact on travel comfort and safety within the Workshop on speed management in urban areas [2]; The Directorate-General for Mobility and Transport of the European Commission prepared a thematic report on road safety and the problem of speeding in the European Union [3]; The Organisation for Economic Co-operation and Development and The European Conference of Ministers of Transport reported on the impact of speeding on the severity of road traffic accidents, the environment and quality of life [4].

As evident from the mentioned sources, speed is an object of studies related to traffic safety and comfort, environmental impact and quality of life. In addition, speed is the basic parameter in traffic simulation software, activity travel scheduling in transport behaviour studies, theoretical analysis of TFs, and traffic management [5]. Such applications often require knowledge of the average speed, the distribution of this random variable, and its percentiles [5, 6]. Most studies on obtaining these characteristics have been conducted in rural areas [7-9], while the studies on speed in urban areas are significantly fewer. Urban traffic conditions are substantially more complicated regarding manoeuvrability and speed [10], with many factors affecting the speed variable. This creates certain difficulties in establishing a speed distribution that could be considered a reference for the elements of urban street networks like intersections, narrow carriageways and places with limited manoeuvring opportunities, including those due to heavy traffic. All of the above indicates the relevance of continuing research on speed variable in urban environment.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The distribution of speed variable is the research object in numerous works, many of which refer to free flow [5, 11]. These works often present experimental research resulting in histograms of vehicle speed distribution for the road sections outside cities without assessing the conformity between empirical and theoretical distribution [12]. The works of this type are made to: assess the current TF parameters flow on a particular road section; determine speed trends, the 50th and 85th percentile of speed, a pace speed, an advisory speed, the speed limits for certain areas; assess the effectiveness of traffic control devices; monitor

the effectiveness of speed enforcement programmes; estimate the impact of the carriageway geometry (horizontal and vertical alignment) on speed; determine the proper location of road signs and markings; establish proper sight distances; assess the impact of speed on road safety; determine the reasons of speeding offences; determine the validity of complaints related to speeding; study the actual or potential effect of the input from the public and officials, etc [6, 9, 12-15].

On rural roads, most vehicles usually have pretty high speeds (much higher than 0) because there is inherently the only speed limit set by road signs or local traffic rules. The influence of other natural or design constraints that complicate traffic is usually eliminated by the choice of road section and period for the survey. For example, manual [7] points to the need to select a road section that would allow recording typical vehicle speeds in free-flow conditions [8] and avoid the effects of vehicles slowing down or accelerating due to traffic signals, intersections, industrial and parking areas, active pedestrian crossings, small radii of horizontal curves, etc. This manual and the handbook [9] indicate that the survey period should not cover or overlap with rush hours, weekends and holidays, public or unique events (festivals, carnivals, concerts, etc.), or adverse weather conditions.

The surveys in free-flow conditions are conducted using radars, lidars, stopwatches, pneumatic tubes, inductive loops, magnetic, microwave, acoustic, ultrasonic, infrared, and laser sensors, as well as sensors that combine several of the listed technologies [7, 9, 16, 17]. Such surveys often provide researchers with data on instantaneous speed in a free flow [17], and the thing these surveys have in common is that they consider the normal distribution typical for the mentioned speed [5, 17, 18]. The results of both local and national scales support this statement. Thus, the statistical release published by the UK Department for Transport [19]. This release assesses vehicle compliance with posted speed limits in free-flowing conditions and presents speed histograms very similar to the histograms of the normal distribution [19].

The US studies also confirm the relevance of using the normal distribution to represent free-flow speed on rural roads – in the report [6], this distribution is mentioned as typical for speed in free-flow conditions with reference to the results of in-depth studies conducted in the 1970s, 1985 and 1990. This can be considered a recognition of the continuous use of the normal distribution as a reference for free-flow speed.

References to the normal distribution of speed in free-flow conditions are present in studies aimed at establishing reasonable posted speed limits. The report [6] states that the 85th percentile of the normally distributed speed is the traditional value to set the speed limit. The reference to the 85th percentile is also mentioned in the European Commission report [20], which examined the impact of the directive on the use of speed limitation devices for specific motor vehicle categories in the European Union (EU) on speed profiles, road safety, fuel consumption, and emissions. This report acknowledges the assumption of a normal distribution of free-flow speed [20].

The similarity of the survey conditions in the works analysed above can be considered the reason for the results' similarity. Even though the goodness-of-fit is rarely assessed statistically, there is no doubt that the empirical histograms can be approximated with the normal distribution.

Although the distribution of vehicle speeds when driving in free traffic flow outside cities can be considered established, the issue of determining a similar distribution and its moments for urban traffic remains open. Urban traffic conditions are more complicated in terms of speed [7] because the speed is influenced here by dense flows, at-grade unsignalized and signalised intersections, narrow carriageways at certain road sections, etc. The purposes of speed studies in urban conditions, in addition to those listed in the first paragraph of this section, also include defining appropriate traffic signal settings and sight distances at the approaches to intersections [9, 13]. Urban studies are impossible in conditions that meet the same requirements for the sites as in the case of rural studies, and this is especially true for street sections in the downtown areas with dense buildings, short road network links, and narrow carriageways.

Urban traffic conditions limit the space and time for manoeuvring [10] and the ability to make certain manoeuvres. The complications of this type affect drivers' choice of speed, and usually, the more complicated the traffic conditions are, the lower the speed. At the same time, the individual driving style of each driver contributes to the speed randomness, which requires additional attention when determining speed distribution.

The number of vehicle speed studies in urban areas is significantly lower, and a certain share of these studies present results consistent with non-urban ones. An example is the paper [21] devoted to studying the motorcycle flow parameters at four locations in the central part of Hanoi, Vietnam. A similar result was obtained in the thesis [11], which also confirmed the possibility of describing the speed of motorcycles passing an intersection in Đống Đa central district in Hanoi with the normal distribution. However, the

normal distribution of the speed of two-wheelers can be explained by their small dimensions, low requirements for road space and high manoeuvrability [11, 22].

Results similar to those obtained in Hanoi are presented in the study of vehicle speed in the free flow at 60 sites on 14 urban arterials in three Taiwan cities – Taipei, Taoyuan and Taichung [23]. Here, speed measurements were made for three vehicle types – motorcycles, small vehicles, and large vehicles. The difference between the results obtained and those analysed in the previous paragraph is that the normal distribution was used to describe the free speed of not only motorcycles but also other vehicle types [23]. This is also supported by the paper [24], which presents survey data from the Zhongxiao arterial road in Taipei.

Paper [25] explores the speed on 17 four- and six-lane roads in the Indian metropolitan areas of New Delhi, Jaipur, and Chandigarh – the authors note that the normal distribution is suitable for describing the speed of separate vehicle types, but at the same time, indicate the non-normality of the combined distribution of the speeds of all vehicles in the TF and the possibility of several modes in the empirical distribution depending on the TF composition. At the same time, the presented density curves allow for noticing a certain shift of the mode of the empirical distributions to the left relative to the mode of the theoretical normal distribution [25]. This can be considered a consequence of complicated traffic conditions in cities.

The tendency of shifting the speed distribution mode to the left is also traced in Ukrainian studies. For example, paper [26] studies the speed distribution on two arterials and two local roads in Kharkiv, Ukraine. As a result, the normal, lognormal, chi-square, and gamma distributions were fitted to speed values from all four locations, emphasising better fitting results for the three latter distributions [26].

A further leftward shift in the mode of speed distribution is presented in the paper [27], which considers speed distribution during the assessment of exhaust emissions from road transport. The authors of that paper took the SETS software [28] settings for the city of Florence, Italy, to simulate eight speed distributions for different complicated traffic conditions up to those close to congestion. The curves of all eight distributions resemble the curves of the gamma distribution with a shape parameter which gradually approaches 1, i.e., they indicate that the speed distribution approaches exponential distribution.

The distributions with a significant right skewness are used in a speed study from Budapest, Hungary [5]. Here, in the influence zones of intersections on the Hamzsabegi Road and Szent Gellert Road, the vehicle speed was studied in various traffic conditions, which determine the TF behaviour. The conditions studied were as follows: accelerated flow, decelerated flow, congestion, free flow, under-saturated flow, and over-saturated congestion (when the traffic volume exceeds the capacity for a long period of time). Only the speed in the under-saturated flow turned out to be describable by a normal distribution. In the other traffic conditions, distributions most suitable for describing the vehicle speed appeared to be as follows: for an accelerated flow – beta distribution; for a decelerated flow – chi-square distribution; for a free flow – lognormal distribution; for a congestion – gamma distribution; for over-saturated congestion – exponential distribution [5]. The obtained results indicate a significant impact of urban traffic conditions and traffic flow parameters, particularly volume and density, on vehicle speed distribution. Paper [5] is one of the few that shows and statistically confirms the possibility of using the exponential distribution to describe vehicle speeds in the most complicated traffic conditions.

A definite left shift in the speed distribution plot for urban traffic conditions can be seen in studies [8, 29], which present the results of observations of the speed before the stop line of two signalised intersections in Kharkiv, Ukraine. In both cases, the exponential distribution was suitable for describing the speed. This is another confirmation that under traffic conditions complicated in terms of speed, the distribution of the speed variable has a significantly left-shifted mode. At the same time, work [8] indicates that vehicle speed is also influenced by the carriageway narrowing in addition to signalised intersections. This influence is not so strong because the gamma distribution best describes the vehicle speed, which is confirmed by the empirical data collected in Kharkiv.

Confirmation of the fact that carriageway narrowing complicates traffic and affects vehicle speed distribution can also be found in other works. For example, in the paper [30], a study of the impact of the roadway geometry and TF parameters on the accident frequency in the state of Washington, USA, found that road sections with a lane width of less than 3.5 m have a lower accident rate due to lower speeds compared to sections with a 'standard' lane width. Similar conclusions were drawn in a study of the same impacts conducted in Canada's Metro Vancouver Regional District [31].

These results can be complemented by an active experiment on a driving simulator at Tongji University, China, which, among other things, studied the effect of carriageway width on traffic speed [32]. The simulator reproduced one-way traffic in a three-lane tunnel and allowed for testing driving scenarios

with lane widths of 2.85 m, 3.00 m, 3.25 m, 3.5 m, and 3.75 m. The experiment results showed a clear trend for speed to decrease as the lane width decreases. The authors explain these results by the fact that drivers feel safer and freer when driving in wider lanes [32]. It should be added that a year earlier than this experiment, the speed was surveyed on eight underground roads in Shanghai [33] to define the relationship between recorded speeds and lane widths, number of lanes, slope grade, and speed limits. The results regarding the relationship between speed and lane width were similar [33].

The analysis of existing speed studies indicates a noticeable influence of urban areas with dense traffic and limited manoeuvring opportunities on the speed variable distribution, which becomes right-skewed compared to the situation of free flow and shows a decrease in the mode and mean. This testifies to the expediency of developing theoretical prerequisites for explaining these changes in the speed distribution, and an initial step in this process is to analytically represent the average speed, which is the first moment of the speed variable.

AIM AND TASKS

Literature review shows that a reduction in road space available to drivers generally reduces traffic speed. In urban traffic conditions, there are many reasons for the decrease in the quantity of space per flowing vehicle, but the most common and understandable are a significant increase in traffic density and the restriction of manoeuvring opportunities caused by traffic management and other road users, or the combined effect of these circumstances. These complications of traffic conditions make it possible to formalise the flow of traffic because they cause significant mutual influence of vehicles, which is not typical for a free flow. The role of this influence in the formation of both the speed distribution and the average speed should be studied in the conditions that, on the one hand, should be characteristic of the urban street network and, on the other hand, should create opportunities for an analytical description of the speeds that drivers choose or are forced to choose. The conditions that meet both requirements regularly appear in urban networks when traffic flows along the following network elements:

- network sections with a temporary or permanent narrowing of the carriageway to one lane at a traffic volume equal to or exceeding the lane capacity;
- sections with traffic restrictions that cause the same consequences and volume-to-capacity ratio;
- two-lane two-way roadways with prohibited overtaking;
- single-lane one-way roads;
- two-lane one-way roads in situations where one lane is occupied by parked vehicles;
- three-lane one-way roads in situations where both the left and right lanes are occupied by parked vehicles;
- tunnels with one lane in each direction;
- sections where there has been a traffic accident which caused partial carriageway blocking;
- all network sections during bad weather, etc.

In everyday life, situations from the above list occur quite often in total, but on the listed sections, there is not always a strong relationship between drivers' behaviours in the TF. At low traffic volume, there may well be free-flow conditions, so a strong interaction between vehicles occurs only when a queue of vehicles is formed at the entrance to a section with one lane available for traffic and no possibility of passing and overtaking. When a queue forms, vehicles cannot move at a speed higher than the speed of the vehicle ahead. In contrast to free flow, this creates opportunities for finding an analytical formula for calculating the average traffic speed, which is very important because it ensures the generality of the research results obtained in this way. At the same time, the fact that drivers choose different speeds under the same traffic conditions can be considered an axiom in an analytical study.

If a queue enters a traffic lane where passing and overtaking are impossible, the obvious consequence is a dense traffic flow in which vehicles form the platoons. Each platoon can split gradually into groups due to the different speeds chosen by drivers. These groups will be led by slow-moving vehicles (SV), limiting the speed of the others – those who would like to travel at a higher speed in the free flow. This creates the conditions for formalising the traffic flow process and deriving the formula for average speed based on the speed of each vehicle in the group within the platoon. For this formalisation, it is also important that those vehicles that travel in the platoon and are not restricted by the SVs should have enough clear road ahead to attain the desired speed. This means that the average speed of the platoon will be a characteristic of a part of the street section somewhat ahead of the point where the platoon was formed. This part, in particular, may be at the exit from the section. At the same time, for macromodelling purposes, the average speed can be considered the space mean speed for the whole section.

In the absence of specific measures to control traffic flows in time and space in urban conditions, the

formation of vehicle platoons can be considered a random process. This is important for the correct statement of the task of determining the average traffic speed on a single-lane road section with no passing and overtaking opportunities because, in this case, we can assume a random order of vehicles and, consequently, the equal probability of each vehicle to take any position in the platoon.

It is reasonable to start searching for a general formula for calculating the average traffic speed on a lane without overtaking opportunities by studying the simplest hypothetical cases. These include the consideration of a moving platoon in which all vehicles tend to drive at the same maximum permitted speed, except for one or two SVs that limit the speed of the others. The case with one SV was studied in the paper [34]. The materials of the paper [34] will be used to derive the formula of the average speed for the case of two SVs in a platoon, which is the purpose of the current paper.

RESEARCH RESULTS

To find an analytical formula to calculate the average vehicle speed in a TF with two SVs that limit the speed of others on a lane with no passing and overtaking opportunities, it is expedient to formalise this problem as follows:

- let N vehicles moving in a dense flow randomly enter a lane where overtaking are not possible;
- let the order numbers of vehicle positions in the platoon start from 0. Under the equal probability of taking any position in the platoon, each vehicle can take the position $[0; N-1]$ with probability $1/N$;
- let all but two drivers want to drive at the maximum permitted speed $V_{\max}$;
- let the driver of the first slow-moving vehicle (SV1) travels at speed V_s , $0 < V_s < V_{\max}$, and the driver of the second slow-moving vehicle (SV2) travels at speed V_2 , $V_2 > V_s$;
- let $\Delta_s = (V_{\max} - V_s)$ be the deviation of SV1's speed from the maximum permitted speed;
- let $\Delta_2 = (V_2 - V_s)$ be the deviation of SV2's speed from SV1's speed.

It is necessary to determine what will be the average vehicle speed at the exit from the lane.

From the mathematical point of view, the simplest case in determining the average vehicle speed on a lane where passing and overtaking are impossible is the presence of one SV in the platoon, Fig. 1. This case is studied in detail in paper [34], where the average vehicle speed at the exit from the lane is initially represented as

$$\bar{V}_x = \frac{x \cdot V_{\max} + (N - x) \cdot V_s}{N} \quad (1)$$

where x is the position of the single SV (SV with speed V_s) in the TF.

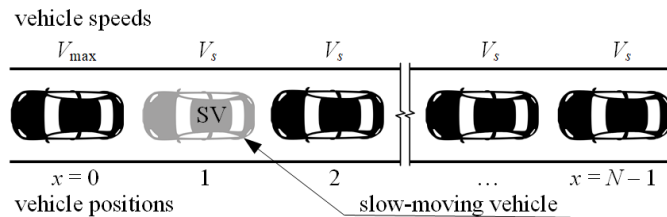


Figure 1 – The representation of the platoon with one slow-moving vehicle [34]

If there is a single SV which travels at speed V_s in the platoon, then, taking into account the equal probability for each vehicle to take any position in the platoon, the desired $\bar{V}$ is defined as follows [34]:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \bar{V}_x = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} (x \cdot V_{\max} + (N - x) \cdot V_s), \quad (2)$$

where $\bar{V}_x$ is the average speed of vehicles in the TF when a single SV takes the position x . Speed $\bar{V}_x$ is possible with probability $1/N$, $x \in [0; N-1]$;

$[x \cdot V_{\max} + (N - x) \cdot V_s]$ is the sum of the speeds of all vehicles in the TF in the case when the only SV (which travels at speed V_s) takes position x in the flow [34].

The use of the introduced designation for Δ_s , as well as the collection of the like terms in the course of removal of brackets with consideration of the identities for the sum of a simple arithmetic progression [35], allowed for obtaining a formula for calculating the average vehicle speed in the TF with one SV on a lane where passing and overtaking are impossible [34]:

$$\bar{V} = V_s + \frac{N-1}{2N} \Delta_s. \quad (3)$$

A more complicated case in terms of analytical representation of the average speed $\bar{V}$ at the exit from a lane with no passing and overtaking opportunities is the consideration of the TF with two SVs, i.e., vehicles that travel at a speed lower than the maximum speed permitted in certain conditions. Given that $V_2 > V_s$,

$$\Delta_s > \Delta_2; \Delta_s, \Delta_2 > 0.$$

The complication with respect to the case of a single SV consists of the following. Since overtaking is prohibited, the speed of $(N-2)$ vehicles whose drivers want to travel at speed $V_{\max}$ will depend on which SV they follow. If they follow the first SV, they will exit the road section at speed V_s . If they follow the second SV only, they will exit at speed V_2 , and the cars ahead of both SVs will exit at speed $V_{\max}$.

If the slowest vehicle (SV1) travelling at speed V_s took the position x in the flow, and this position is ahead of the second SV (SV2), Fig. 2, then the average vehicle speed at the exit from the lane will be the same as in the simplest case with one SV in the flow. The probability of this event is $1/N$. To calculate the average speed in this situation, Eq. (1) can be used.

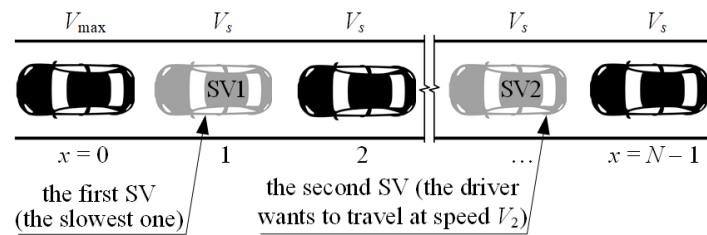


Figure 2 – The representation of the platoon with two SVs when the slowest one is ahead of the other one

With the same probability $1/N$, the second SV travelling at speed V_2 can take the position x ahead of the first SV (which is the slowest). Then, all the vehicles ahead of SV2 will travel at the maximum (permitted) speed $V_{\max}$, SV2 will travel at speed V_2 , and the vehicles which follow SV2 will travel either at speed V_2 if there is no SV1 ahead of them or at speed V_s otherwise, Fig. 3.

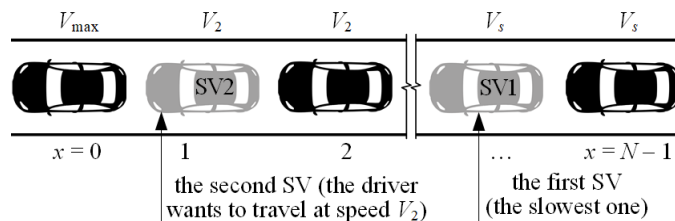


Figure 3 – The representation of the platoon with two SVs when the faster one is ahead of the slowest one

Thus, the case of one SV studied in [34] and represented by Eq. (1)-(3) can be applied to $(N-x-1)$ vehicles after position x in the flow, but with a maximum speed equal to V_2 . Then, their average speed $\bar{V}_x$,

where x denotes the position in the flow taken by the second SV, can be determined from the equation written based on Eq. (3) and the number of vehicles in the flow after the position x :

$$\bar{V}_x = V_s + \frac{N - x - 2}{2(N - x - 1)} \Delta_2. \quad (4)$$

The probability of the event that one of the two SVs takes position x in the flow is equal to $2/N$, and the probability of taking the position x by each of the two SVs is equal to $1/N$. Therefore, for the average speed of the whole platoon, it is possible to write

$$\bar{V}_x = \frac{1}{2} \bar{V}_{x1} + \frac{1}{2} \bar{V}_{x2}, \quad (5)$$

where $\bar{V}_{x1}$ is the average traffic speed when the first SV takes the position x in the flow;

$\bar{V}_{x2}$ is the average traffic speed when the second SV takes the position x in the flow.

It should be noted that the mandatory presence of one SV behind the other SV, regardless of the speed of these vehicles, means that the vehicle that moves ahead has not N , but only $(N-1)$ alternatives for positioning in the flow.

By analogy with Eq. (2), based on Eq. (5) and new designations, it is possible to write the equation for the unconditional average speed of the whole platoon when all possible alternatives for positioning two SVs among N vehicles are considered:

$$\bar{V} = \frac{1}{2} \bar{V}_1 + \frac{1}{2} \bar{V}_2. \quad (6)$$

where $\bar{V}_1$ is the average traffic speed for all $x \in [0; N-2]$ if the first SV takes position x in the flow;

$\bar{V}_2$ is the average traffic speed for all $x \in [0; N-2]$ if the second SV takes position x in the flow.

For each position x of the first SV, it is necessary to determine the total number of situations when it can be in this position. This number is known and equal to.

$$\frac{N!}{N} = (N-1)!, (0, 1, 2, \dots, N-2), \quad (7)$$

that is the number of permutations of the remaining cars regardless of the value of x . And if the first SV is in the first position ($x=0$), the number of permutations corresponds to Eq. (7).

As for the next positions, it should be kept in mind that in the situation under consideration, i.e., when the first SV (the slowest one) is ahead of the second SV in the flow, only fast vehicles can be ahead of the first SV. To consider this fact while examining the positions $x > 0$ of the first SV when it is ahead of the second SV, it is necessary to subtract from Eq. (7) the number of situations when the second SV is ahead of the first SV.

Then, when the first SV is in the second position ($x=1$), the second SV can be ahead of it only in the first position and as many times as there are permutations of the rest, only fast vehicles (willing to drive at a higher speed). The number of these permutations is equal to the factorial of the number of fast vehicles, i.e., $(N-2)!$. This means that the number of situations when the first SV is in the second position ($x=1$) and ahead of the second SV is equal to $[(N-1)! - (N-2)!]$.

If the first SV is in the third position ($x=2$), then the second SV can be ahead of it either in the first or in the second position, again, in each case as many times as there are permutations of fast vehicles for which it does not matter whether they are ahead of or behind the first SV. In any case, the number of permutations of the fast vehicles is equal to $(N-2)!$. Then, the total number of situations in which the first SV is in the third position ($x=2$) and ahead of the second SV is equal to $(N-1)! - (N-2)! - (N-2)! = (N-1)! - 2(N-2)!$.

Similarly to the already considered situations, if the first SV is in the fourth position ($x = 3$), then the second SV can be in the first, second and third positions ahead of it, again, in each case as many times as there are permutations of fast vehicles, i.e., $(N - 2)!$. Then the total number of situations in which the first SV is in the fourth position ($x = 3$) and ahead of the second SV equals to $[(N - 1)! - 3(N - 2)!]$.

A similar situation occurs for each position of the first SV when it is ahead of the second SV, and in general, the relationship for the number of situations that arise for each position of the first SV can be written as follows:

$$(N - 1)! - x(N - 2)! = (N - 2)!(N - 1 - x). \quad (8)$$

Eq. (8) makes it possible to write down the relationship for the average traffic speed when the first SV is in the position ahead of the second SV:

$$\bar{V}_1 = \frac{\sum_{x=0}^{N-2} (N - 2)!(N - 1 - x) \cdot \frac{(x \cdot [V_s + \Delta_s] + [N - x] \cdot V_s)}{N}}{\sum_{x=0}^{N-2} (N - 2)!(N - 1 - x)} \quad (9)$$

where $(N - 2)!(N - 1 - x)$ is the number of situations when the first SV in the flow consisting of N vehicles occurs ahead of the second SV and takes position x ;

$\frac{(x \cdot [V_s + \Delta_s] + [N - x] \cdot V_s)}{N}$ is the speed of the TF in which the first SV travels in the position x ahead of the second SV.

After factoring out the multipliers independent of x , removing the square brackets and obviously cancelling similar terms, Eq. (9) is simplified to

$$\bar{V}_1 = \frac{\sum_{x=0}^{N-2} (N - 1 - x) \cdot (N \cdot V_s + x \cdot \Delta_s)}{N \cdot \sum_{x=0}^{N-2} (N - 1 - x)}. \quad (10)$$

Separating the two parts in the numerator by the sum terms $N \cdot V_s + x \cdot \Delta_s$ results in

$$\bar{V}_1 = \frac{N \cdot V_s \cdot \sum_{x=0}^{N-2} (N - 1 - x)}{N \cdot \sum_{x=0}^{N-2} (N - 1 - x)} + \frac{\Delta_s \cdot \sum_{x=0}^{N-2} (N - 1 - x) \cdot x}{N \cdot \sum_{x=0}^{N-2} (N - 1 - x)},$$

and after that, a simpler relationship for $\bar{V}_1$ becomes available:

$$\bar{V}_1 = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{N-2} (N - 1 - x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{N-2} (N - 1 - x)}. \quad (11)$$

To simplify further transformations, it is reasonable to introduce the temporary variable $M = N - 1$ instead of $(N - 1)$, and this results in the following equation:

$$\bar{V}_1 = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{\sum_{x=0}^{M-1} (M-x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{M-1} (M-x)} = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \left[\frac{M \sum_{x=0}^{M-1} x - \sum_{i=0}^{M-1} x^2}{\sum_{x=0}^{M-1} M - \sum_{x=0}^{M-1} x} \right].$$

Now, it is necessary to simplify the expression in square brackets using the well-known identities for the sum of arithmetic progression [35]:

$$\frac{M \sum_{x=0}^{M-1} x - \sum_{x=0}^{M-1} x^2}{\sum_{x=0}^{M-1} M - \sum_{x=0}^{M-1} x} = \frac{\frac{M^2(M-1)}{2} - \frac{M(M-1)}{2} \cdot \frac{2M-1}{3}}{M^2 - \frac{M(M-1)}{2}},$$

and then

$$\frac{\frac{M^2(M-1)}{2} - \frac{M(M-1)}{2} \cdot \frac{2M-1}{3}}{M^2 - \frac{M^2}{2} + \frac{M}{2}} = \frac{\frac{M(M-1)}{2} \left[M - \frac{2M-1}{3} \right]}{\frac{M(M+1)}{2}} = \frac{(M-1) \left[M - \frac{2M-1}{3} \right]}{M+1}.$$

After these transformations, the initial number of vehicles in the TF $N = M + 1$ can be returned to the obtained fraction instead of the temporary variable M :

$$\frac{(N-2) - \left[N-1 - \frac{2N-2-1}{3} \right]}{N} = \frac{(N-2) \cdot \frac{1}{3} N}{N} = \frac{N-2}{3}.$$

Taking into account the obtained result, Eq. (11), which represents the average traffic speed when the first SV (the slowest one) takes a position ahead of the second SV, transforms to the following final formula:

$$\bar{V}_1 = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-2}{3}. \quad (12)$$

The second summand in Eq. (6) should be considered in more detail based on (i) new designations introduced at the beginning of this section, (ii) awareness that each term under the summation sign is the sum of the speeds of all vehicles in the flow (like in Eq. (2)), (iii) considerations from the two paragraphs before Eq. (4).

When two SVs travel in the flow (platoon) and the faster one is ahead of the slower one, each determines the speed for the following vehicles. This forms not two but three groups of vehicles in the flow, and the summand under the summation sign should reflect this situation. Therefore, the second term of the x -th summand should no longer reflect the speed of all vehicles following the very first SV, as in the case of a single SV in the TF (see the terms of the summand $\bar{V}_x$ in Eq. (2)), but their average speed, which differs depending on the position of the first SV in the tail of the flow and behind the second SV travelling at speed $V_2 > V_s$. Then, the sum of the speeds of all vehicles in the flow, provided that the second SV is in position x and the first SV follows it at some other position remaining in the flow, can be derived through the number of vehicles following the second SV and their average speed determined from Eq. (4):

$$x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_2) + (N-x-1) \cdot \bar{V}_x.$$

Here, the first term represents the sum of the speeds of the vehicles which travel at the maximum permitted speed ahead of the second (faster) SV, the second term is the second SV's speed, and the third

term is the sum of the average speeds of the vehicles following the second SV, which depends on the position of the first (slowest) SV.

Since the proportions between the number of vehicles in the groups under the location of the SV in position x do not depend on which of the SV is located in that position, the number of situations when the second SV can be ahead of the first SV will also be represented by Eq. (8). Given that multiplier $(N-2)!$ is independent of x and the transformations made in Eq. (9) and Eq. (10), Eq. (8) can be simplified and introduced to the formula for $\bar{V}_2$:

$$\bar{V}_2 = \frac{\sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x) \cdot \frac{(x \cdot (V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_2) + (N-x-1) \cdot \bar{V}_x)}{N}}{\sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x)}. \quad (13)$$

The substitution of Eq. (4) into Eq. (13) results in the following:

$$\bar{V}_2 = \frac{\sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x) \cdot \frac{\left(x(V_s + \Delta_s) + (V_s + \Delta_2) + (N-x-1) \left[V_s + \frac{N-x-2}{2(N-x-1)} \Delta_2 \right] \right)}{N}}{\sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x)},$$

$$\bar{V}_2 = \frac{\sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x) \cdot \left(x[V_s + \Delta_s] + (V_s + \Delta_2) + (N-x-1) \cdot V_s + \frac{N-x-2}{2} \Delta_2 \right)}{N \cdot \sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x)},$$

$$\bar{V}_2 = \frac{\sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x) \cdot \left(x \cdot \Delta_s + N \cdot V_s + \Delta_2 + \frac{N-x-2}{2} \Delta_2 \right)}{N \cdot \sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x)}.$$

Removal of the brackets in the numerator results in three terms, and the first two of them correspond to the expression to the right of the equal sign in Eq. (10), which was transformed into Eq. (11). This allows for collecting the like terms taking into account Eq. (11):

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2 \sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x) + \sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x) \cdot \frac{N-x-2}{2} \Delta_2}{N \cdot \sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x)},$$

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{N} + \frac{\Delta_2}{2N} \frac{\sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x) \cdot (N-x-2)}{\sum_{x=0}^{N-2} (N-1-x)}. \quad (14)$$

The introduction of the temporary variable $M = N-1$ into the fraction at multiplier $\frac{\Delta_2}{2N}$ in Eq. (14) results in the following:

$$\begin{aligned}
& \frac{\sum_{x=0}^{M-1} (M-x) \cdot (M-x-1)}{\sum_{x=0}^{M-1} (M-x)} = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} (M^2 - 2 \cdot x \cdot M + x^2 - M + x)}{\frac{M(M+1)}{2}}, \\
& \frac{M^3 - 2M \sum_{x=0}^{M-1} x - M^2 + \sum_{x=0}^{M-1} x^2 + \sum_{x=0}^{M-1} x}{\frac{M(M+1)}{2}}, \\
& \frac{M^3 - M^2(M-1) - M^2 + \frac{M(M-1)}{2} \frac{2M-1}{3} + \frac{M(M-1)}{2}}{\frac{M(M+1)}{2}}, \\
& \frac{M^3 - M^3 + M^2 - M^2 + \frac{M(M-1)}{2} \frac{2M-1}{3} + \frac{M(M-1)}{2}}{\frac{M(M+1)}{2}}, \\
& \frac{M(M-1) \frac{2M-1}{3} + M(M-1)}{M(M+1)}, \\
& \frac{(M-1) \left[\frac{2M-1}{3} + 1 \right]}{M+1}.
\end{aligned}$$

Back substitution of the initial number of vehicles in the TF $N = M + 1$ instead of the temporary variable M leads to the final form of the fraction in Eq. (14):

$$\frac{(N-2) \left[\frac{2N-2-1+3}{3} \right]}{N} = \frac{2}{3} (N-2).$$

With this in mind, Eq. (14) takes the final form

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 + \frac{\Delta_2}{N} \left[1 + \frac{N-2}{3} \right]. \quad (15)$$

Now it is possible to substitute Eq. (12) for the traffic speed in situation when the first (slower) SV is ahead of the second SV and Eq. (15) for the traffic speed in situation when the second (faster) SV is ahead of the first SV in Eq. (6) and obtain the final relationship for the desired speed of a dense traffic with two SVs at the exit of a road section with one lane available for traffic without passing and overtaking opportunities:

$$\bar{V} = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-2}{3} + \frac{\Delta_2}{2N} \cdot \left[1 + \frac{N-2}{3} \right]$$

or

$$\bar{V} = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-2}{3} + \frac{\Delta_2}{2N} \cdot \frac{N+1}{3}. \quad (16)$$

Eq. (16) makes it possible to trace the impact of both SVs' speeds and the total number of vehicles in the TF on the average speed in considered traffic conditions.

DISCUSSION

The preliminary analysis of Eq. (16) indicates that, *ceteris paribus*, the impact of the second SV's speed represented by the third term in the equation on the average speed $\bar{V}$ decreases nonlinearly with the increase in N , Fig. 4. On the contrary, the influence of the second term, which corresponds to the contribution of the first (slowest) SV, increases nonlinearly with the increase in N .

This result is logical since the second SV's speed, being closer to $V_{\max}$, has less impact on the average speed of the platoon than the speed of the first SV, the slowest one. These impacts can be characterised as follows: as $N \rightarrow \infty$, the average platoon speed does not exceed the V_s by more than $(\Delta_s/3 + \Delta_2/6)$. It is also worth noting that the coefficients at the terms in Eq. (16) are the reciprocal triangular numbers (1, 1/3, 1/6) [36-38].

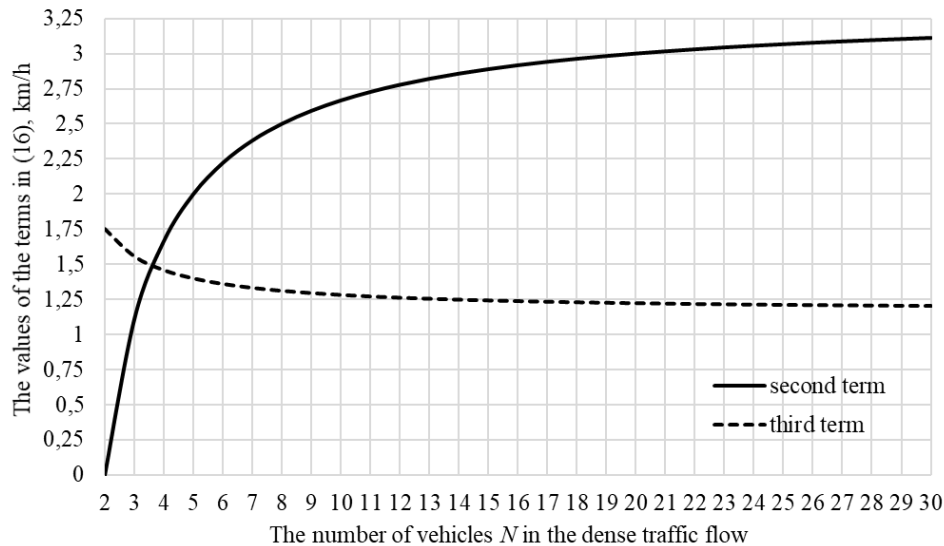


Figure 4 – Illustration of the impact of the terms in Eq. (16) on the average vehicle speed in a dense traffic flow with two SVs for different total number of vehicles in the flow: example for $\Delta_s = 10$ km/h and $\Delta_2 = 7$ km/h

This may be used to characterise a significant decrease in the contribution of the second SV to the average speed $\bar{V}$ compared to the contribution of the first SV. A graphical interpretation of this decreasing impact is shown in Fig. 5.

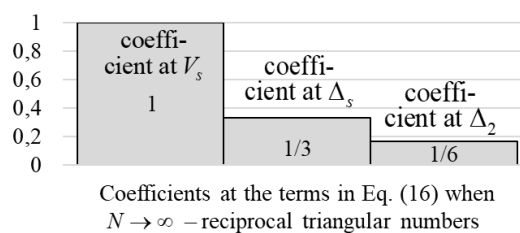


Figure 5 – Graphical interpretation of the decreasing impact of the second SV on the average platoon speed compared to the impact of the first SV

Under the minimum number of vehicles in the platoon, i.e., at $N = 2$, the average platoon speed will not exceed V_s by more than a quarter of Δ_2 .

The discovered properties of the average traffic speed on a road section with one lane available for traffic without overtaking opportunities induce further research to derive the formulas for the cases with a larger number of SVs in a platoon.

CONCLUSIONS

The existing studies of vehicle speed as a random variable suggest that using a normal distribution to describe vehicle speed on rural roads is generally recognised. As for the distribution that would be suitable for describing vehicle speeds in urban areas, no consensus has been reached. One part of the research results points to the possibility of using the already mentioned normal distribution, and the other part points to

several distributions with right skewness, i.e., with a left-shifted mode. The latter include the lognormal, gamma, beta, chi-square distribution, etc. These distributions were fitted to the speeds recorded in the influence zones of unsignalized and signalised intersections, in dense traffic, and on narrow lanes. In general, traffic conditions at the listed places restrict the space available for driving as well as manoeuvring opportunities, making driving complicated in terms of speed.

The analysis of all these studies makes it possible to identify the transformation of the histogram of the speed distribution from one that can be described by a normal distribution to one that an exponential distribution can describe, and this occurs with a change in traffic conditions from the free flow on rural roads to complicated conditions in urban areas. This indicates quite a clear general trend of decreasing vehicle speed as traffic conditions become more complicated. Still, there is no theoretical background for explaining this trend and the transformation of the associated speed distribution. To develop this background, it is reasonable to study the flow of vehicles in conditions opposite to free flow, i.e., when there is a strong interaction between road users.

In this paper, we have studied a dense traffic flow in which vehicles travel in a platoon along a road section with one lane available for traffic without the overtaking possibility. As a result, formulas for calculating the average speed in traffic flow for the simplest cases – when the platoon contains only one or two SVs, which make other drivers drive at a speed lower than they want to – were obtained.

The obtained results are the initial steps to determine the first moment of the speed distribution and create the preconditions for developing the study presented in this paper by considering more complex cases with a larger number of SVs. Ultimately, this should allow us to obtain a general relationship for calculating the average vehicle speed in the TF with any number of SVs. This relationship will be a basis for deepening knowledge about the limiting effects of a dense flow with SVs on vehicle speeds that would be normally distributed under free-flowing conditions and have a higher average value.

REFERENCES

1. World Health Organization (2023). *Global status report on road safety 2023*. WHO. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/9789240086517-eng.pdf?sequence=1>.
2. Eichinger-Vill, E., & Kvashilava, G. (2022). *Speed management in urban areas Current status, international best-practices and recommendations for Georgia* (Presentation). UNECE. https://unece.org/sites/default/files/2022-10/E.%20Eichinger-Vill_G.%20Kvashilava_SessionV_speed.pdf.
3. European Commission (2020). *Road safety thematic report – Speeding*. European Road Safety Observatory. EC, Directorate General for Transport. https://fsr.eu.europa.eu/wp-content/uploads/2020/12/2020-10-08-road_safety_thematic_report_speed.pdf.
4. Joint OECD/ECMT Transport Research Centre (2006). *Speed Management*. OECD Publishing. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/06speed.pdf>.
5. Maghrour Zefreh, M., & Török, A. (2020). Distribution of traffic speed in different traffic conditions: an empirical study in Budapest. *Transport*, 35(1), 68–86. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.11725>.
6. Transportation Research Board (1998). *Managing Speed : review of current practice for setting and enforcing speed limits* (Special Report 254). National Academy Press. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr254.pdf>.
7. MassSAFE (2005). *Spot Speed Study Workshop Instruction Manual*. University of Massachusetts. <https://studylib.net/doc/8230425/spot-speed-study-workshop-instruction-manual>.
8. Hoogendoorn, S.P. (2005). Unified approach to estimating free speed distributions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(8), 709–727. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.09.001>.
9. Center for Transportation Research and Education (2002). *Handbook of Simplified Practice for Traffic Studies*. Iowa State University.
10. Maghrour Zefreh, M., Török, Á., & Mészáros F. (2017). Average Vehicles Length in Two-lane Urban Roads: A Case Study in Budapest. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 45(4), 218–222. <https://doi.org/10.3311/PPtr.10744>.
11. Vũ Đức Minh. (2021). *Improvement of traffic management efficiency in transport zones of a city* [PhD dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University]. KhNAHU. https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/Захисти_PhD/Дисертація_Мінх.pdf.
12. Garber, N.J., & Hoel, L.A. (2009). *Traffic and Highway Engineering* (4th ed.). Cengage Learning.
13. Robertson, H.D., Hummer, J.E., & Nelson, D.C. (1994). *Manual of Transportation Engineering Studies*. Prentice Hall.
14. Tefft, B.C. (2011). *Impact Speed and a Pedestrian's Risk of Severe Injury or Death* (Technical Report). AAA Foundation for Traffic Safety.

15. Taylor, M.C., Lynam, D.A., & Baruya, A. (2000). *The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents* (TRL Report 421). Transport Research Laboratory.
16. Hua, C. (2013). Comparison of field speed data collection methods. In *Proceedings of the 16th Road Safety on Four Continents Conference*. <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:758838/FULLTEXT01.pdf>.
17. Federal Highway Administration (2025). *Speed Management Safety* (FHWA Highway Safety Programs). U.S. Department of Transportation, FHWA. <https://highways.dot.gov/safety/speed-management/speed-management-eprimer-rural-transition-zones-and-town-centers/3>.
18. Berry, D.S., & Belmont, D.M. (1951). Distribution of vehicle speeds and travel times. In *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*: (pp. 589–602).
19. Department for Transport (2024). *Vehicle speed compliance statistics for Great Britain: 2023*. DfT. <https://www.gov.uk/government/statistics/vehicle-speed-compliance-statistics-for-great-britain-2023/vehicle-speed-compliance-statistics-for-great-britain-2023>.
20. European Commission (2013). *Ex-post evaluation of Directive 92/6/EEC on the installation and use of speed limitation devices for certain categories of motor vehicles in the Community, as amended by Directive 2002/85/EC*. Directorate-general for Mobility and Transport. [https://road-safety.transport.ec.europa.eu/document/download/a620b7fb-48dd-4ac5-9652-4ca47a936a5d_en?filename=speed limitation evaluation en.pdf](https://road-safety.transport.ec.europa.eu/document/download/a620b7fb-48dd-4ac5-9652-4ca47a936a5d_en?filename=speed%20limitation%20evaluation%20en.pdf).
21. Minh, C.C., Sano, K., & Matsumoto, S. (2005). The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 1496–1508. <https://doi.org/10.11175/easts.6.1496>.
22. Y, N.C., Minh, C.C., Sano, K., & Matsumoto S. (2009). Motorcycle Equivalent Units at Road Segments under Mixed Traffic Flow in Urban Road. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 7. https://www.jstage.jst.go.jp/article/eastpro/2009/0/2009_0_320/pdf.
23. Tseng, P.Y., Lin, F.-B., & Chiung-Chang W. (2013). Analysis of Free-flow Speed Characteristics of Urban Arterials. *Asian Transport Studies*, 2(4). 363–378. <https://doi.org/10.11175/eastsats.2.363>.
24. Wong, K.I., Lee, T.-C., Chen, Y.-Y. (2013). Traffic Characteristics of Mixed Traffic Flows in Urban Arterials. *Asian Transport Studies*, 4(2), 379–391. <https://doi.org/10.11175/eastsats.4.379>.
25. Dhamaniya, A., & Chandra, S. (2013). Speed Characteristics of Mixed Traffic Flow on Urban Arterials. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 7(11), 883–888.
26. Riabushenko, O., Sierpinski, G., Bogomolov, V., Nahliuk, I., & Leontiev, D. (2024). Study of Distribution of Free Flow Speeds on Urban Road Sections Depending on Their Functional Purpose and One-Way Traffic – Evidence from Kharkiv (Ukraine). *Applied Sciences*, 14(23), 11302. <https://doi.org/10.3390/app142311302>.
27. Trozzi, C., Vaccaro, R., & Crocetti, S. (1996). Speed frequency distribution in air pollutants' emissions estimate from road traffic. *Science of The Total Environment*, 189 & 190, 181–185. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05208-4](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05208-4).
28. Trozzi, C., Vaccaro, R., Digiovandomenico, P., & Crocetti S. (1995). SETS: Estimate of air pollutants emission from road traffic. In *Proceeding of the 4th International Software Exhibition for Environmental Science and Engineering "Software per l'Ambiente"*: (pp. 221–226).
29. Horbachov, P., Minh, V.Đ., & Shtanko, I. (2020). Distribution regularities of motor vehicle speed on city streets. *Advanced Information Systems*, 4(2), 163–169. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.24>.
30. Milton, J., & Mannering, F. (1998). The Relationship Among Highway Geometries, Traffic-Related Elements and Motor-Vehicle Accident Frequencies. *Transportation*, 25. 395–413. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005095725001>.
31. Sawalha, Z., & Sayed T. (2001). Evaluating Safety of Urban Arterial Roadways. *Journal of Transportation Engineering*, 127(2), 151–158. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2001\)127:2\(151\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:2(151)).
32. Liu, S., Wang, J., & Fu, T. (2016). Effects of Lane Width, Lane Position and Edge Shoulder Width on Driving Behavior in Underground Urban Expressways: A Driving Simulator Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13, 1010. <https://doi.org/10.3390/ijerph13101010>.
33. Liu, S., Wang, J., Zhang, L., & Fang, S. (2015). Characteristic and Prediction Model for Operating Speed Model in Urban Underground Road. *Journal of Tongji University*, 43(11), 1677–1683. <http://dx.doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2015.11.010>.
34. Horbachov, P., & Svichynskiy, S. (2024). The average speed of a dense traffic flow with one slow-moving vehicle on a road section with limited manoeuvring opportunities. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 2(23). 57–64. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1526>.
35. Korn, G.A., & Korn, T.M. (2000). *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review* [Revised Edition]. Dover Publications.

36. Thoo, J.B., & Shell-Gellasch, A. (2015). *Algebra in Context: Introductory Algebra from Origins to Applications*. Johns Hopkins University Press. <https://doi.org/10.1353/book.49475>.
37. Beldon, T., & Gardiner, T. (2002). Triangular numbers and perfect squares. *The Mathematical Gazette*, 86(507), 423–431. <https://doi.org/10.2307/3621134>.
38. Bruckman, P., Dence, J.B., Dence, T.P., & Young, J. (2013). Series of Reciprocal Triangular Numbers. *The College Mathematics Journal*, 44(3), 177–184. <https://doi.org/10.4169/college.math.j.44.3.177>.

Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Середня швидкість щільного транспортного потоку з двома повільними автомобілями на ділянці дороги з обмеженими можливостями маневрування

Існуючий спектр досліджень швидкості руху транспортних засобів вказує на велику увагу до даного параметру транспортного потоку як такого, що впливає на безпеку і комфорт руху, навколишнє середовище і якість життя. Даний параметр також є одним із найважливіших у транспортному моделюванні, де знаходять застосування закон розподілу випадкової величини швидкості, його перцентилі, а також модальне та середнє значення цієї величини. Більша частина літератури презентує підсумки обстежень швидкості на ділянках позаміських доріг і магістральних вулиць міст, де рух є здебільшого вільним. Загальним для цих досліджень є визнання нормального розподілу як типового для швидкості транспортних засобів у вільному потоці, а також можливості практичного використання перцентилів даного розподілу, його моди і математичного сподівання. Цього не можна сказати про результати вивчення швидкості у міських умовах руху, ускладнених щільними транспортними потоками і обмеженими можливостями маневрування. У таких умовах проведено суттєво меншу кількість досліджень. Вони не демонструють консенсусу щодо можливості застосування якогось одного референтного розподілу швидкості, але в той же час об'єднані тим, що вказують на тенденцію зміщення моди розподілу вліво у порівнянні з ситуацією вільного руху і зменшення середнього значення швидкості. Дана стаття презентує початкові кроки дослідження швидкості в складних міських умовах, коли наявний сильний вплив транспортних засобів один на одного, який можна спостерігати на ділянках доріг з однією доступною для руху смугою без можливості виконання маневрів обгону або випередження. У даному дослідженні з використанням формули для розрахунку середнього значення швидкості пачки автомобілів з одним повільним автомобілем виведена формула для розрахунку середньої швидкості пачки у ситуації з двома повільними автомобілями, які обмежують швидкість інших. Дані формули дозволяють поглибити знання про обмежуючі впливи щільного потоку на швидкості транспортних засобів та перший момент їх розподілу, а також наблизитись до отримання залежності для розрахунку середньої швидкості транспортного потоку при будь-якій кількості повільних автомобілів у ньому.

Ключові слова: швидкість руху, середня швидкість, транспортний потік, щільність потоку, смуга руху, умови руху, аналітичне моделювання, транспортна система.

ГОРБАЧОВ Петро Федорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8180-4072.

СВІЧИНСЬКИЙ Станіслав Валерійович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: stas_svichinsky@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8549-1712.

Peter HORBACHOV, DSc in Transport Systems, Professor at Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8180-4072.

Stanislav SVICHYNSKYI, PhD in Transport Systems, Postdoctoral Researcher, Associate Professor at Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: stas_svichinsky@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8549-1712.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1707

УДК: 656.6
UDC: 656.6

Petro Movchan, Oleksandr Sharko
Postgraduate, Kherson State Maritime Academy (Odessa), Ukraine

STRUCTURING THE MAIN RESEARCH AREAS, MODELS AND METHODS OF MARITIME TRANSPORT MANAGEMENT

This review aims to perform an intelligent analysis of various sources compiled based on modern scientific publications, industry and international conferences, market analytics, and development trends. The complexity and fragmentation of the research topics associated with the uncertainty of the influence of the external environment on the functioning of transport infrastructure facilities and global changes in the structure of relations are noted. It is shown that the development of transport logistics is characterized by the fact that simultaneously with its concept, there is a process of developing methodological foundations for new technologies for managing information support, processing and protection of information. Modern technologies for creating intelligent control systems are considered, and possible areas for improvement are indicated. The obtained information is structured into a basis on which trends in logistics development in maritime transport are laid: intelligent automation, robotics, big data analytics, the Internet of things, cybersecurity, cloud platforms, blockchain, and artificial intelligence. From the standpoint of maritime transport logistics, the advantages, disadvantages and areas of rational use of the proposed structuring are analyzed. This made it possible to identify promising areas of scientific research and provide a basis for constructing conceptual transportation models in complex operating conditions.

Keywords: maritime transport logistics, development trends, uncertainty, intellectualization, management, structuring.

INTRODUCTION

Information and communication technologies are the primary tools for modernizing the transport sector. Creating a single information space for all participants in the interactions characterizes them. The specifics of maritime transport require constant information exchange, network equipment and long-distance data transmission technologies, various server equipment, information architecture, and operating systems. Optimization of transport technologies is the central aspect of successful transportation management, which allows for a significant increase in efficiency, a reduction in costs, and an improvement in the quality of delivery.

Improving all stages of the transportation logistics chain is the key to the rational use and development of the entire transport system. The introduction of information technologies helps to increase reliability and reduce risks in transport logistics.

Modern technologies make it possible to track the movement of goods by sea in real time. This makes it possible to promptly respond to potential threats and ensure goods' safety at all transportation stages.

The number of publications on the problem of managing maritime transportation under challenging operation conditions and the external environment's unpredictable influence is constantly growing. Finding the information acceptable for solving specific transport management problems takes a lot of effort. To facilitate the search for the required sources, it is necessary to structure the available information by directions and modern trends in the development of the industry. This determines the relevance and necessity of this work.

ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND STATEMENT OF THE PROBLEM

In transport logistics, information technology is used as a set of measures, software, and hardware for transmitting, processing and consuming information. Transport logistics tasks are solved not only in maritime transport but also in the area where there is a docking in the transportation of goods by different modes of transport and, consequently, between different data processing systems. The iterative nature of the decision-making process underlies the construction of mathematical models adequate to real transport processes and economic conditions, using optimization methods and searching for rational management solutions. The optimization problem consists of three components: variables (vessels, ports), restrictions on the use of these variables associated with the technical capabilities of the vessel and the target function that needs to be minimized or maximized. Searching for and analyzing information on the current state of such management models in the complex conditions of the transport industry is an extremely complex technical task since the keywords for the search are common and overlapping. Therefore, it is necessary to structure information by directions, tasks to be solved, results achieved, ways of using, methods of obtaining information, effectiveness and development prospects. Due to the specific nature of research on maritime transport associated with the uncertainty of the influence of the external environment, such structuring of information is timely and necessary.

This review of analytical materials presents materials for systematization, analysis and evaluation of information by processing a large volume of diverse information on the problem of sea transport in the conditions of dynamic changes in the external environment, obtained from SCOPUS and Web of Science abstracts, domestic and foreign literature, materials of international conferences and symposia, publications in periodicals.

To the unresolved parts of the general problem Information support for models and methods for managing the development of maritime transport technologies includes the creation of an analytical base of modern information and the latest achievements in the field of maritime transport logistics for the implementation of transport operations in difficult operating conditions of equipment.

GOAL AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The aim of the work is the structuring of the main areas of research, models and methods of managing maritime transport.

The tasks of the work are:

- information base for a single information space on transport transportation in complex conditions of their functioning,
- identification of the main characteristics and directions of development of transport transportation management contained in development trends,
- determination of prospects for the development of maritime transport transportation in the dynamic influences of the external environment.

RESEARCH RESULTS AND THEIR DISCUSSION

Sea transportation plays an important role in international trade and is the main way of delivering goods between countries. Their advantages over other types of transportation include high load capacity, the ability to transport large-sized and heavy cargo, and availability of delivery to different coastal regions. One of the conditions for the successful development of sea freight transportation and infrastructure modernization is the optimal use of resources and technologies to support management decisions with information. Optimization of sea transport logistics processes is the search for and implementation of solutions that allow logistics operations to be performed faster and at lower costs.

Adapting existing sea transportation technologies to changing vehicle operating conditions is the essence of the ongoing transformational changes aimed at modernizing the industry.

Trends in the development of transport logistics include the following main areas:

- intelligent automation, robotization, digital transformation of sea cargo terminals and port facilities;
- big data analytics on traffic, distances, port congestion, route optimization, fuel consumption, delivery time;
- use of the Internet of Things (IoT) to track the status, position and movement of goods using GPS modules, sensors, accelerometers, Internet protocols and addresses, control systems;
- cybersecurity to protect digital systems and data of transport logistics;
- mobile applications for planning operations based on up-to-date data;
- blockchain of innovative technologies for registering and confirming transactions when checking the authenticity of documents and maintaining the integrity of information, which allows all participants in the transportation process to synchronize actions in real time;
- use of cloud platforms and technologies for logistics management and routing, planning, monitoring and control of transportation, which helps to increase the flexibility and scalability of transport systems and reduce costs;
- application of artificial intelligence in traffic management and demand forecasting and adaptation to emerging situations.

A review of domestic and foreign scientific sources devoted to the optimization of transport processes, mathematical modelling of sea transport technologies and new modern research areas in this area made it possible to identify the main areas of research, grouping them by methods of obtaining and analyzing information accompanying all the details of the transport process (Fig. 1).

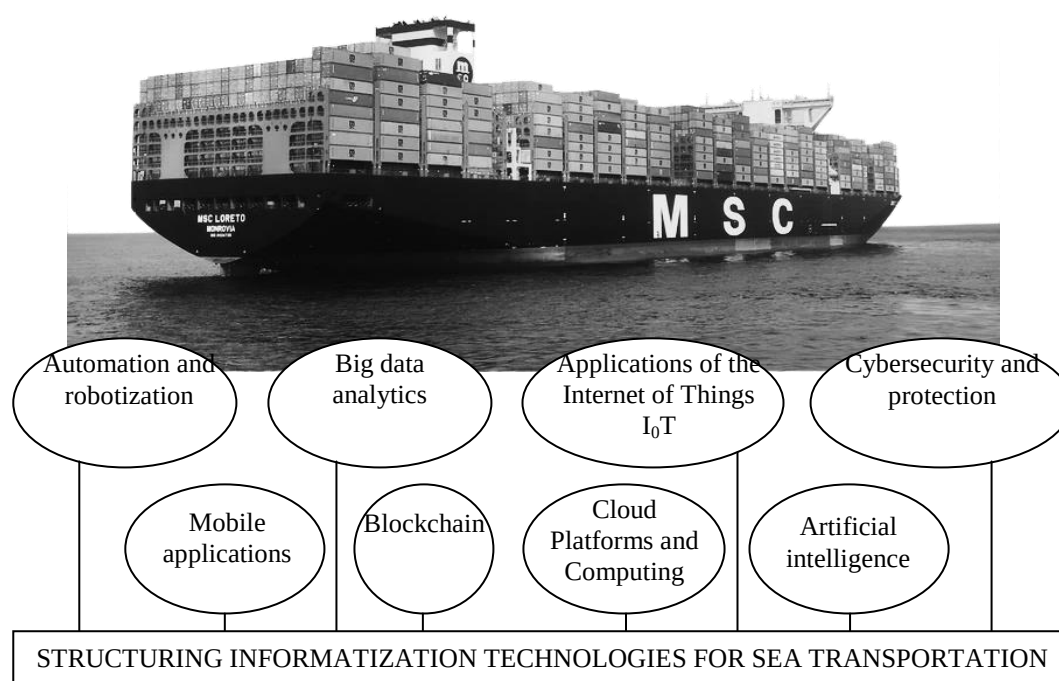


Fig. 1 - Structuring the main directions of research into the development of transport services

Intelligent automation and robotics

The most popular in the practical application of information technologies in transportation in difficult conditions of operation of transport facilities are works related to intelligent automation, robotics, digital transformation of sea cargo terminals, automation of port facilities, creation of software and hardware systems for remote control of operations.

Due to the complexity of the maritime transport infrastructure, modeling of ongoing processes is used to study the complex relationships between factors influencing the external environment and the risk of making unfounded decisions. International communications require optimization of routes and traffic safety when passing not only through open spaces, but also through deep-water channels. In [1], the channel management structure is considered from the standpoint of intelligent automation and robotics. Intelligent automation and robotics as one of the components of the trends in the development of maritime transport is described in [2] when developing an approach to optimizing the threshold values of factors based on a two-criteria nonlinear model when conducting port control. Recommendations are given for the selection of ranges of threshold values, weight points and optimization parameters when inspecting port control in Hong Kong. Digital twin technologies in management intelligence play a crucial role in the modernization and optimization of various sectors of maritime transport, shipbuilding, and operation. The integration of digital technologies into transport logistics provides additional value by increasing operational efficiency and sustainability [3]. Automatic identification of vessel tracking, real-time monitoring of maritime traffic using big data is described in [4].

In [5], it is shown that speed optimization has an impact on reducing fuel costs. This is a problem of management decisions. Theoretical fuel consumption functions have limitations due to weather conditions during voyages. Using Copernicus archive data as a source of big data, intelligent automation and optimization of a particle swarm, and the search for optimal Pareto solutions are performed using intelligent analysis and metaheuristic optimization based on a given route. Practical results are discussed.

When establishing a vessel's movement schedule by adjusting the speed and modes of the vessel's movement, the problem is formulated as a multi-objective optimization of taking into account various factors with the support of big data. Three objectives were pursued: minimization of distances between ports of departure and destination, minimization of total financial losses, and compliance of the average speed with restrictions on individual sections of the route. A compromise between the objectives was achieved by approximating Pareto solutions. The problem of multi-objective optimization was considered in [6] when designing sea deliveries for the fishery industry. An integrated problem of routing, location, and distribution of vessels is presented. Two objective functions are considered: maximization of resource coverage and minimization of the total cost of deliveries. An algorithm for multi-objective modeling based on k-means clustering is proposed.

Machine learning algorithms and models for high-quality forecasting of the estimated time of container ships applied to cabotage transportation using an automatic identification system and meteorological data with a reduction in the response time for decision-making and the use of a training data set are presented in [7]. The root-mean-square error in forecasting the arrival time of container ships was 19.5 min.

Container ships, approaching their destination, reach the waters of the anchorage, where they wait for their turn when the berth becomes free. Therefore, the exact schedule and time of their mooring are so important, since ports are often overloaded. The speed of arrival at a specific time is also important. Container ships do not require special preparation of holds, operate in moderate climatic conditions, without freezing of ship structures. A feature of their use is work in the directions of transitions without straits and narrows.

In [8], a decision-making mapping structure is proposed for managing the operations of seaports and container terminals. It is noted that the objects of management are characterized by fragmentation, complexity and uncertainty of properties relative to the potential capabilities of Industry 4.0 technologies. The proposed structure is adapted with a focus on digital technologies, automation and robotics.

In [9], analytical and management tools for forecasting the arrival time of ships and distributing the resources of a container terminal are described. A dynamic learning algorithm based on neural networks is proposed that reduces uncertainty intervals by taking into account terminal operations and rational distribution of workload.

The dynamics of operational decisions in the operation of the Constanta sea container terminal for the transportation of bulk cargo and issues of optimizing container handling operations by berth and port cranes are presented in [10]. The number of movements and the order of container retrieval are minimized, the optimal sequence of operations is searched for taking into account the statistical significance between operational indicators.

Sea transport is an alternative modal logistics for transporting goods over long distances. At the same time, such uncertainty characteristics as navigation and climate conditions, types of cargo, time frames of vessel operation by the port, and mooring times make their own adjustments to the transportation schedule. In [11], an algorithm of the decision tree model for predicting the time of stay of vessels in Brazilian ports is proposed. It is shown that the geographical and cargo characteristics of the transportation process can be used in the model for developing logistics planning of the waterway. In [12], critical success factors of the global shipping area are described. Interactions and digital displays express innovative potential, risk management capabilities, strategic and technological capabilities. Organizational and managerial ideas for setting priorities in resource allocation are considered. In [13], the creation of an automated and optimized decision support system using an integer linear programming model for order management with the definition of optimal loading configurations from peripheral warehouses to vehicles is described. The resulting system operation plan is aimed at ensuring efficiency and reducing non-value-added operations of transported goods in scenarios with a central shipping point and several peripheral warehouses. Computational tests conducted on a real example confirmed the efficiency of the proposed system.

The shipping industry at the present stage of its development is moving towards the integrated use of automation, information and intelligence. Intelligent shipping is a new form of integration of modern information, artificial intelligence and other high-tech elements. In [14], the state of affairs on the creation of an intelligent inland waterway container ship for the Beijing-Hangzhou Canal is presented. In it, the power system, propulsion device, and optimization of the engine room layout are integrated into the overall design.

By the end of 2023, the global logistics automation market reached \$68.5 billion. According to Mordor Intelligence forecasts, this figure will exceed \$109.7 billion in 2028. Logistics automation involves the use of equipment, control systems and software.

Big data analytics

Transport management under conditions of uncertainty of the external environment and risk requires a large amount of a priori input information, its processing and interpretation to obtain informed decisions. Issues of big data analytics in transport logistics are of interest from the point of view of their various practical applications.

A prototype of an intelligent decision support system for inland port logistics is presented in [15]. It is noted that port logistics is characterized by high complexity, fragmentation and uncertainty. A multi-agent simulation model of horizontal and vertical interaction between cargo agents is presented, which combines optimization dynamic modeling with elements of decision theory. The model allows us to estimate the probability of the influence of an intelligent decision support system on inland container transportation and

to formulate an optimal strategy for cooperation between dynamic demand and supply of cargo agents in domestic container transportation.

A number of strategies for sustainable maritime container transportation are proposed in [16] by optimizing fuel consumption, counteractions and disruptions in the transportation sector. A mathematical model for routing and planning ship traffic, loading and unloading containers taking into account weather disasters is proposed. A methodology for selecting alternative options based on big data analysis is presented.

For example of successful development and application of information technologies in the maritime transport industry is big data analytics for optimizing traffic flows. Among them, the work [17] should be noted, which presents a scenario-based machine learning approach to port logistics planning aimed at reducing the time required to handle the cargo volume of ships. Numerous uncertainty factors are noted, including weather conditions and mechanical problems. A mixed linear program and a genetic algorithm scheme for port logistics planning are proposed, taking into account the distribution of berths and the purpose of berth cranes.

In [18], a tool for optimizing costs and fuel consumption when modeling ship speeds in various weather conditions was developed. The results of experiments carried out in real conditions were used in routing and planning ship traffic in difficult weather conditions. In the development of this methodology, in [19] the integration of mathematical models into the risk management system for maritime transport was performed.

A solution to a similar problem for assessing the safety of water transport on the rivers of China is presented in [20]. Based on the theory of fuzzy logic and analysis of data on accidents in water transport, a structure for determining the environmental pollution index was built. The advantages of the proposed index over traditional fixed values of the index determined without taking into account uncertainty and risk are shown.

The considered trends of the problem of big data analytics in the structure of directions and developments in the optimization of transport transportation include optimization of the routing of transport transportation for seafood. In [21], transportation problems are limited by the specificity of cargo associated with time restrictions on the freshness of products and throughput windows. A stochastic solution for routing vehicles is proposed taking into account the transportation conditions. It is compared with the decision tree method, dynamic programming and ant colony optimization.

In [22], big data analytics is used to assess international multimodal connections. A new type of index and methods for measuring them are proposed in the interaction of rail transport and shipping, including the cost of cargo categories and delivery time, which are associated with the uncertainty of COVID-related transportation. The development of a methodology for assessing multimodal connections is associated with cargo tracking technology, a unified price control mechanism, and expansion of the capacity of transport corridors.

The use of big data analytics in [23] was carried out to analyze the causes of disasters related to the operation and management of ports. Ways and directions for preventing disasters with the implementation of intelligent operations are proposed. In [24], the application of big data is shown in the use of a digital twin of traffic management, travel time forecasting and intelligent routing of traffic flow. The digital twin characterizes a virtual computerized representation of an intelligent transport system for simulating and integrating data. A deep learning algorithm for dynamic processing of current information and support for route selection is proposed. Computational procedures for using data in congested traffic conditions made it possible to determine the most efficient route for a vehicle, minimizing travel time under uncertainty.

The use of big data analytics finds its application in container shipping. An interesting experience of managing container exchanges in the maritime area is described in [25]. To reduce the costs of managing container shipping, shipping companies lease containers from container leasing companies. Two shipping companies can exchange empty containers with each other in different ports to eliminate transportation costs for empty containers. To minimize costs, the carrier must find the maximum number of pairs of carriers that can exchange containers. The problem of maximum matching in a large common graph is solved. A distributed algorithm for solving this problem is proposed.

Modeling of transport and logistics schemes for maritime transportation using big data analysis is performed in [26]. Modern economic conditions are characterized by a large volume of generated data, the maximum use of which is an advantage in ensuring competitiveness [27]. The disadvantages of this group of structuring the main directions of developments to improve the management of transport transportation lie in the expert presentation of the analyzed information with qualitative and probabilistic assessments, which

reduces the effectiveness of the methods considered.

Using the Internet of Things

In maritime transport, the application of the Internet of Things is used to improve ship-to-shore communications for intelligent traffic management and the creation of interfaces between ships, as well as to make the right management decisions when passing through locks and areas with heavy ship traffic. The Internet of Things is used to develop systems that support navigation in complex environments under adverse weather conditions to improve safety.

Among the trends in the development of transport and transport logistics, it is worth noting the work on the use of the Internet of Things, reflected in the proceedings of the IEEE Conference on Information and Safety in Transport [28], which includes research on diagnostic methods and malfunction of a marine engine, a differential positioning system based on deep learning, and optimization of transport modes.

Maritime transport makes a significant contribution to global economic development, but at the same time is a powerful source of air pollution. In [29], one of the ways to use the Internet of Things (IoT) to track the dynamics of transport and calculate the intensity of an air pollution source is presented. Based on the Gaussian optimization model, specific emission characteristics and influencing factors identified through simulation experiments, search algorithms and optimization templates on 86 vessels, the prospects for using remote environmental monitoring are shown.

To determine the routes of multimodal transportation under uncertain conditions of the Chinese transportation network, an optimized transportation system was created in [30] to regulate the time and cost of transportation under transshipment capacity constraints. The interval number ranking theory and the transformation of uncertain parameters into deterministic values using the weighted evaluation method were used. The optimization problem with multiple objectives is transformed into a single-objective problem. For sensitivity analysis, a particle swarm optimization algorithm and a hybrid algorithm for the influence of the risk coefficient were created.

In [31], route optimization in seasonal multimodal transportation under uncertainty of transportation time and seasonal fluctuations in the cold chains of transport logistics was considered. It was found that with an increase in temperature, cooling costs increase, which leads to an increase in total costs when it is necessary to reduce transportation time. The uncertainty of transportation time affects transportation costs. A scenario optimization model has been developed that controls costs and increases transportation efficiency, the implementation of which allows for appropriate management decisions to be made.

The transition to digital technologies in shipping and port operations is described in [32]. The problems associated with the use of the Internet of Things are considered: cargo volume, vessel sizes, service innovations. The idea of creating smart ports and platforms that combine cooperation and coordination of transport agents is put forward. The Maritime Logic Connect model has been developed to implement these interactions, which is a key factor in ensuring the long-term competitiveness of ports. The prospects for the digital transformation of shipping in the direction of optimized cargo handling, improved maritime procurement and logistics processes, and increased safety of transportation are described in [33]. The use of the Internet of Things in transportation from the point of view of spare parts supply chain management is described in [34]. Supply chain and spare parts logistics operations include high complexity and uncertainty of the movement of economic assets, global points of demand and supply, strict time windows, and the need for consolidation in regional warehouses. Effective logistics chain management is a set of proposals and recommendations for the supply chain of spare parts in the maritime sector.

The use of the Internet of Things to solve the problems of managing maritime transport in complex interactions with the external environment is reflected in the work [35]. It is noted that software solutions in the direction of organizing, managing and optimizing the actions of all agents of the transport process of transportation often do not have full integration and are used as support tools, rather than as an extension of the business. A modular scalable integrated platform for managing maritime transport logistics is presented, focused on business transportation with a large hardware infrastructure and adaptability to consumer demands.

The Internet of Things combines information, sensor, control and communication technologies for representing transport services. Difficulties in modeling the environment, platforms and tools do not always correspond to an adequate display of reality. In [36], an approach is presented that supports the integrated specification of multiple aspects of intelligent transport systems, the external environment, a network of sensors and actuators. The implementation framework of the proposed approach is carried out using a model editor to create specifications compatible with the code generator. Guidelines for the application of this framework are developed.

The main provisions for using the Internet of Things in transportation should be noted.

In their organization, intelligent systems using the Internet of Things comply with

- the principle of integration and reuse of data;
- the principle of systematicity for obtaining information at all levels of management;
- the principle of variability in the transmission of large volumes of data in a short time.

The need to implement intelligent systems using the Internet of Things in the transport sector is determined by the following factors:

- a large number of information flows, in which each cargo transportation is accompanied by various data;
- the need to record information;
- the interest of the consignee in information;
- the close connection of information with the final cost of transportation.

Cybersecurity of transport logistics data protection

Transport is one of the most vulnerable industries to cyber threats and attacks on the information technology systems of transport components. In maritime transport, cyber attacks and failures in information systems can lead to disruptions in fuel management, loading systems and control over the balance systems of large vessels. In 2023, the number of cyber attacks on transport companies increased by 36% compared to the previous year. The spread of digital technologies in transport logistics has led to increased transport efficiency and expanded revenue channels, so this sector is particularly vulnerable to cyber attacks. The main cybersecurity challenges in maritime transport include the insufficient use of operational technologies, new communication channels integrated into digital systems and their protection. For many companies in the maritime transport and logistics sector, large amounts of information are collected in an online platform where they automate the management and optimize the logistics and monitoring of vessels. To counteract the threats of transport attacks, robust models and algorithms are developed that are capable of identifying and ignoring small distortions, as well as filtering input data to detect anomalies and atypical deviations.

A practical cybersecurity approach to uncertainty and sensitivity analysis in supply chain optimization is presented in [37]. Statistical analysis and computation with intensive use of data supported by a cybernetic system are implemented through the integration of data management, mathematical modeling, uncertainty analysis and scenario sensitivity. Using cybersecurity software, optimal supply chain configurations with data visualization are determined.

The use of advanced information and communication technologies in organizing a cyber-physical system as a topological structure is presented in [38]. A strategy that takes into account multidimensional uncertainties in a cyber-physical model for joint optimization of navigation planning and routing, including potential route failures in cyberspace and renewable energy fluctuations in physical space. Based on the construction of the model, a three-level problem of minimizing the impact of route line failures in cyberspace while maintaining operating costs is formulated. The proposed strategy demonstrates greater system stability compared to other strategies.

A detailed consideration of cyber-physical systems with the inclusion of such components as electrical communication networks, industrial enterprises, transport networks, ports and shipping, many networked household appliances via the Internet of things is considered in [39]. It is shown that cyberspace in maritime transport is an element of cyberspace that needs to be managed from the standpoint of considering personnel relations. A cyberspace model is proposed that takes into account the range of possible attacks and ensures the security of representation protection.

The issues of cybersecurity of information and communication technology solutions and digitalization in ports and shipping are clearly presented in [40]. New technologies of various types of digital systems, seaports and cybersecurity of such aspects of management as electronic navigation, coastal monitoring systems, intelligent shipping, radio communication technologies in the maritime sphere are described. Conceptual clarity is provided regarding the applicability of various technologies and systems.

Maritime shipping involves sailing in relative isolation from the main world. At the same time, new technologies, satellite data transmission, shore support system and other means of interaction require protection of their operations from existing risks and cybersecurity. Autonomous and unmanned vessels are especially exposed to the risk of cyberattacks. In [41], the relevance of cybersecurity for such vessels is analyzed. A picture of threats is presented, the existing regulatory framework, standards and guidelines for cybersecurity, editorial materials are considered.

The issue of the survivability of autonomous vessels during cyberattacks is devoted to the work [42]. The susceptibility, vulnerability and ability of a vessel to recover from a threat related to cybersecurity are

studied. It was found that automated vessels are highly susceptible to cyberattacks, the consequences of which are associated with financial losses, damage to the vessel, and injuries. The future of maritime shipping is determined by the transition to automated vessels, which can provide significant financial and logistical advantages for shipping companies.

Cybersecurity measures in ports and maritime shipping are distributed unevenly. Distribution depends on the operation of global ports and shipping facilities. The article [43] is devoted to increasing the efficiency of threat detection and management. It is shown how the application of artificial intelligence algorithms in the field of ship operation and port security can strengthen cyber defense. Cybersecurity of the maritime industry, the integration of artificial intelligence for planning a comprehensive cybersecurity strategy are discussed. Specific options and development scenarios are considered. The issue of cybersecurity of the maritime transport industry using autonomous vessels is devoted to the work [44]. Autonomous shipping is the most promising technology that can radically change the shipping sector due to the introduction of unmanned vessels. Communication, data exchange and digital systems are of crucial importance in their functioning. Vulnerabilities for the emergence of cyber threats in them include hacking, data loss, unwanted interference. The safe operation of systems such as navigation and cargo movement management depend on protection from cyber threats. Hackers can potentially exploit the weaknesses of any of these systems.

In [45], the ways of implementing marine technologies are analyzed and cybersecurity issues are reflected. It is shown that the maritime industry is implementing stages of digital transformation, while paying increased attention to cyber protection of information and cybersecurity of solutions. The ways of implementing modern technologies using PcWorx software and wireless technologies are analyzed.

Mobile applications for planning operations

Mobile applications for planning operations based on current data from the functioning of intelligent transport systems include cellular networks and positioning devices using geographic information. In [46], an integrated algorithm for engineering optimization and support for vehicle planning in intelligent transport systems is proposed. The algorithm combines hardware and software components of intelligent transport systems and information support for the supply chain. Mobile phones, network positioning, and telephone networks regulating traffic flows are used for implementation.

In [47], mobile technical applications for safe navigation at sea are shown. An automatic system for vessel identification, planning, and control based on big data analytics is presented. An algorithm for an intelligent system and an adaptive neural network implementing the technology for finding the optimal route is developed. The results of the study represent a strategic resource for the technology for finding the required path.

Optimization of routing and safety in maritime safety applications is described in [48]. Monitoring of the vessel's performance, thrust, and rudder angle is performed using sensors installed on the vessel. The data received by the sensor is collected and sent to the Internet of Things (IoT) and then to the genetic algorithm of the classifier for determining the shortest path of data transmission to the cloud. As a result of this technology, the throughput of information increases and the optimal route is determined.

In the information space of maritime transport technologies, the spread of mobile computing and cloud servers is the driving force of revolutionary changes, in which the user uses several electronic platforms at the same time, with the help of which he can access all the necessary information. Mobile devices use their cell phones to check email, browse the Internet and can be integrated with cloud computing services. The Mobile-Cloud area extends the paradigm of integrating a mobile application into the cloud. In [49], a cloud computing architecture is proposed for integrating a mobile application with various services on mobile devices.

Sea transportation of bulk grain cargoes requires mandatory monitoring of their quality and preservation of their properties. In [50], a series of mobile applications is described: a sampler with a hardware device and sensors for measuring temperature, relative humidity, intergranular carbon dioxide in the delivery time profile. The transport logistics monitoring system contributes to the reduction of grain losses, sustainability and food security.

In [51] the use of cloud computing as a tool for promoting mobile applications in the maritime sector is considered. It is shown that using cloud technologies it is possible to quickly deploy mobile applications. The boundaries of artificial intelligence in transport in the implementation of freight transportation are presented in [52].

Mobile applications for planning operations based on current data help to maintain optimal conditions for cargo requiring temperature control. Sensors installed in containers reduce the likelihood of damage to

cargo in transit. If the temperature inside begins to rise, sensors and mobile applications allow you to fix the problem in time. In addition to temperature, sensors monitor vibrations and other functional changes in maritime transport. Using Internet of Things sensors, you can monitor the condition of equipment by collecting data on vibrations, temperature and other parameters. They help to identify signs of wear and tear and perform maintenance in advance.

Blockchain

Blockchain is a distributed ledger technology that allows transactions to be recorded in a ledger in several places at the same time without involving a central authority or intermediaries. The advantages of blockchain are the elimination of the need for standardization of electronic data exchange and the need for a common format for this data when structuring messages.

In the context of accelerating digitalization, one of the promising areas for solving management problems is the adaptation of blockchain technologies to maritime transport. These tools ensure transaction transparency, clarity of the cargo delivery process and reduce risks associated with the human factor.

Blockchain, due to such characteristics as immutability, tracking, management and provenance, allows for the creation of system solutions for recording key performance indicators and distributing incentives. In [53], current exercises of a blockchain-based incentive system for maritime transport operations for the delivery of goods in accordance with the port resource schedule are proposed. A prototype of the Solana blockchain-based system has been implemented.

Using blockchain technologies, it is possible to block unauthorized access to data for recording information about vessels, global risks and their impact on transportation. There are several initiatives to apply blockchain technology in the field of container shipping, documentation and customs clearance.

Playing a key role in the global transportation system, they face numerous problems related to port congestion, delivery delays, complex documentation, difficulties in tracking containers. Blockchain provides decentralization, transparency and controllability of transactions and the ability to track cargo. In [54], a distributed governance model of blockchain is proposed, facilitating the shared responsibility of tracking and monitoring hazardous materials in real time from the point of departure to the destination.

An interesting use of blockchain as a resource for combating corruption in the global shipping industry is [55]. The use of blockchain digital technologies for full disclosure of transactions, reducing uncertainty, insecurity and ambiguity is described. A model for identifying interactions of institutional entities with technical resources of the industry and the conditions for their implementation is proposed.

In [56], the use of blockchain for coordinating information along supply chains is analyzed. It is shown that blockchain technology can form a new decentralized dynamic ledger management structure for container shipping supply chain and interactions between dispersed parties.

It is worth noting the following general provisions about blockchain technology. Blockchain is a technology of decentralized storage and distribution of transaction records based on cryptographic methods of information protection, allowing to exclude intermediaries. It is used to create cybersecurity technologies, representing a common digital notebook. Blockchain is a method of secure storage and transmission of data in the form of a chain of blocks, each of which contains information about the previous one. Blockchain technology is an advanced database mechanism that allows to organize open exchange of information within a business network. The blockchain platform, maximally protected from hacker attacks and interference of government services, is completely open to users. Blockchain in logistics is used to track the movement of goods. Each stage of the supply chain is recorded in the system, and participants in the process see information about the status and location of the cargo.

Using cloud platforms

Cloud platforms are a set of tools designed to run and use applications remotely. Today, no other industry working with transport demonstrates such a level of dependence on digitalization and analytics. In its practical activities, it provides access to computing resources from any device connected to the Internet. Cloud services have emerged due to the development of Internet speeds, the growth of computing power and the leap in the capabilities of network equipment. Cloud computing integrates automation in the logistics and supply chain process. It helps to increase transparency, scalability, flexibility and cost savings.

Prioritization of traffic is necessary when ships resort to expensive satellite communications, which entail high latency and have a narrow bandwidth. Near the coastline, ships can switch to 5G-based communications

and use the capabilities of cloud computing. There are three main categories of cloud computing models - infrastructure as a service, platform as a service, software as a service. In [57], a cloud network testbed is proposed that supports network schedule generation to simulate satellite and 5G communications

between an edge cloud located on board a vessel and another edge cloud located on board another vessel or on shore. Potential applications include emulating peer-to-peer communications and mesh networks.

Conventional maritime information technologies such as the Internet of Things and artificial intelligence place computing nodes far from data collection points. This situation is limited by the real-time requirements for message processing. Cloud computing decentralizes computation, storage, and network resources to ensure efficient data processing. In [58], cloud computing architecture, emerging applications, examples, and future possibilities for maritime data management are discussed, providing references for optimization of control and navigation. Similar works devoted to mobile cloud computing are [59, 60]. Mobile cloud computing has a number of disadvantages such as low bandwidth, mobile status monitoring, limited storage capacity for mobile learning [61].

The transition to cloud computing provides a huge advantage from reducing IT costs. In addition, businesses receive bonuses: instant updates of the necessary software, disaster recovery capabilities, and expanded functionality for collaboration.

Cloud solutions also play a key role in ensuring data security. In logistics, where information about cargo, its condition, and location must be protected, they help prevent leaks when exchanging messages between mobile IoT devices and corporate servers.

Artificial intelligence

The use of artificial intelligence opens up broad prospects for its application in maritime transport. One of the promising areas of this topic is the creation of autonomous vessels capable of independently analyzing the navigation situation and making decisions without the participation of the crew. A number of countries such as Norway, Denmark, and Finland are already actively testing prototypes of future unmanned vessels. According to experts, mass production of such vessels will begin in the next decade.

Artificial intelligence technologies make it possible to analyze data from various sources and meteorological conditions in real time, predict the development of the navigation situation and recommend a course without grounding and collisions, optimally place cargo in the terminal, and reduce downtime.

Artificial intelligence technology has changed the logistics paradigm, creating the core of Industry 4.0 for making fast and accurate decisions in uncertain situations when processing large volumes of data. Since logistics is based on multilingual data flows, logistics systems controlled by artificial intelligence lead to new ideas and increased efficiency. In the work [62], a global supply chain and logistics management using neural machine translation of transport logistics operations is developed.

The integration of artificial intelligence in promoting sustainable development of maritime transport, shipping and port operations is considered in the work [63]. By solving the emission problem, optimizing the use of transport efficiency, artificial intelligence offers transformative potential in fuel optimization, route planning, intelligent energy management and logistics. Practical examples for the port of Rotterdam illustrate the success of the implementation.

Artificial intelligence is revolutionizing and shaping the working environment, not only representing an innovative task, but also the operating conditions creating unique opportunities in various areas of maritime transport logistics. In [64], an artificial intelligence approach to the implementation of business processes of the information flow of orders for shipment to the warehouse is considered. An algorithm for recognizing the text of consignment notes is developed to reduce the workload on personnel. Technical improvements and structural changes are made. The use of artificial intelligence to improve the efficiency of maritime transport logistics in warehousing is reflected in the work [65].

In maritime transport, such a development as intelligent navigation of ships has appeared. In the work [66], it is shown that the use of intelligent navigation reduces the possibility of human error, reduces carbon emissions, and improves logistics. Deep learning and multi-scale target detection algorithms are considered.

Of particular scientific interest is the carbon accounting system for real-time marine fleet decarbonation developed in [67], which uses machine learning models to track carbon emissions at 15-minute intervals. The structure of the system includes such factors as vessel navigation characteristics, weather, and sea conditions. By integrating it with a cloud computing platform, shipping companies can improve their voyage planning and route adjustments to optimize operational efficiency.

The use of sensors to monitor equipment parameters and ship tracking, the implementation of an electronic cartographic and information system on board ships to improve navigation safety, provides digitalization of fleet transformations. [68] notes that these transport efficiency improvement tools are fundamental to improving transport productivity.

While AI has shown significant advances in fuel efficiency, emission reduction, environmental monitoring, planning and optimization of operations, it has a number of challenges such as high

implementation costs, data privacy issues and response difficulties. Continued development of AI technologies can contribute to significant progress towards sustainability and efficiency in maritime shipping.

CONCLUSIONS

Key trends and modern research technologies are specified based on the completed review of trends in the development of maritime transport logistics. Given the importance of the maritime sector in the global economy, companies trying to remain competitive must actively implement advanced technologies. The areas of interest in the prospective development of transport transportation show increased attention to research on automation, computer engineering, general knowledge in information technology, artificial intelligence, cloud computing, cybersecurity, and integrating technologies. Progress in information technology allows for solving completely new engineering problems.

The presented structuring made it possible to identify the main areas of use of information technology in maritime transport logistics, most often encountered in applications and practical applications, and to determine the main paths along which the development of the transport industry is taking place. It is shown that the development of logistics of transport transportation is characterized by the fact that simultaneously with its concept, there is a process of developing methodological foundations for new technologies for managing information support, processing and protection of information.

REFERENCES

1. Wang, N., Chang, D., Yuan, J., Shi, X., Bai, X. (2020) How to maintain the safety level with the increasing capacity of the fairway: A case study of the Yangtze Estuary Deepwater Channel. *Ocean Engineering*, 216, art. no. 108122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108122>
2. Yan, R., Liu, Y., Wang, S. (2024) A data-driven optimization approach to improving maritime transport efficiency. *Transportation Research Part B: Methodological*, 180, art. no. 102887 URL: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.102887>
3. Bhati, M., Goerlandt, F., Pelot, R. (2025) Digital twin development towards integration into blue economy: A bibliometric analysis. *Ocean Engineering*, 317, art. no. 119781 URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119781>
4. Cheraghchi, F., Abualhaol, I., Falcon, R., Abielmona, R., Raahemi, B., Petriu, E. (2017) Big-data-enabled modelling and optimization of granular speed-based vessel schedule recovery problem. *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2017*, 2018-January, pp. 1786-1795. doi: 10.1109/BigData.2017.8258122
5. Lee, H., Aydin, N., Choi, Y., Lekhavat, S., Irani, Z. (2018) A decision support system for vessel speed decision in maritime logistics using weather archive big data. *Computers and Operations Research*, 98, pp. 330-342. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.005>
6. Yixuan, W., Ya, L., Nuo, W. (2023) A GIS-based maritime supply chain network design of distant-water fisheries. *Computers and Electronics in Agriculture*, 214, art. no. 108321 URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108321>
7. Valero, C.I., Martinez, A., Oltra-Badenes, R., Gil, H., Boronat, F., Palau, C.E. (2022) Prediction of the Estimated Time of Arrival of container ships on short-sea shipping: A pragmatcal analysis. *IEEE Latin America Transactions*, 20 (11), pp. 2354-2362 doi: 10.1109/TLA.2022.9904760
8. Caldwell, S., Darlington, R. (2022) Industry 4.0 Mapping Strategic Decision Making for Seaport Operations Management. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 335 LNNS, pp. 743-756. doi: 10.1007/978-3-030-90532-3_56
9. Fancello, G., Pani, C., Pisano, M., Serra, P., Zuddas, P., Fadda, P. (2011) Prediction of arrival times and human resources allocation for container terminal. *Maritime Economics and Logistics*, 13 (2), pp. 142-173. doi: 10.1057/mel.2011.3
10. Robert-Alexandru, D., Noel-Mircea, Z., Mariana, P., Fanel-Viorel, P., Dumitru, D. (2023) The dynamics of a maritime container terminal complex system: optimization process design. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 12493, art. no. 124930A URL: <https://doi.org/10.1117/12.2643261>
11. Abreu, L.R., Maciel, I.S.F., Alves, J.S., Braga, L.C., Pontes, H.L.J. (2023) A decision tree model for the prediction of the stay time of ships in Brazilian ports. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, art. no. 105634. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105634>
12. De, A., Wang, J., Tiwari, M.K. (2021) Fuel Bunker Management Strategies within Sustainable

- Container Shipping Operation Considering Disruption and Recovery Policies. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 68 (4), art. no. 8758221, pp. 1089-1111 doi: 10.1109/TEM.2019.2923342
- 13.Dotti, G., Iori, M., Subramanian, A., Taccini, M. (2024) An Integrated Decision Support System for Intra-Logistics Management with Peripheral Storage and Centralized Distribution. *International Conference on Enterprise Information Systems, ICEIS - Proceedings*, 1, pp. 612-619. doi:10.5220/0012581600003690
- 14.Xu-Ming, W., Xue-Min, S., Wei-Qin, L., Xueqing, B., Hong-Liang, D. (2023) A Technical Design of Inland Intelligent 64 TEU Container Ship for Beijing-Hangzhou Canal. *7th IEEE International Conference on Transportation Information and Safety, ICTIS 2023*, pp. 1029-1034. doi:10.1109/ICTIS54573.2021.9798522
- 15.Iraneshad, E., Prato, CG, Hickman, M. (2020) An intelligent decision support system for inland port logistics. *Decision Support Systems*, 130, № 113227. doi: 10.1016/j.dss.2019.113227
- 16.Brrar, S., Lee, E., Yip, T.L. (2023) An Exploratory Study of the Critical Success Factors of the Global Shipping Industry in the Digital Era. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 18 (2), pp. 795-813. URL: <https://doi.org/10.3390/jtaer18020041>
- 17.Oudani, M., Sebbar, A., Zkik, K., Belhadi, A. (2023) A Prescriptive Analytics Approach for Port Logistics Planning. *9th 2023 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2023*, pp. 77-81 doi: 10.1109/CoDIT58514.2023.10284173
- 18.Norlund, E.K., Gribkovskaia, I. (2017) Environmental performance of speed optimization strategies in offshore supply vessel planning under weather uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, pp. 10-22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.002>
- 19.Yang, Z.L., Qu, Z. (2016) Quantitative maritime security assessment: A 2020 vision. *IMA Journal of Management Mathematics*, 27 (4), pp. 453-470. doi: 10.1093/imaman/dpw005
- 20.Liu, L., Wan, P., Wu, C., Zhou, T. (2015) Research on Yangtze River waterway transportation safety evaluation model based on fuzzy logic theory. *ICTIS 2015 - 3rd International Conference on Transportation Information and Safety, Proceedings*, art. no. 7232186, pp. 732-738. doi: 10.1109/ICTIS.2015.7232186
- 21.Soenandi, I.A., Juan, Y., Budi, M. (2017) Optimization for routing vehicles of seafood product transportation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 277 (1) doi:10.1088/1757-899X/277/1/012048
- 22.Guo, L., Jiang, C., Hou, W., Ng, A.K.Y., Shi, Q. (2024) International multimodal transport connectivity assessment of multimodal transport from mainland China to Europe. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 186, art. no. 103564. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103564>
- 23.Yang, Z.-Z., Yang, Y.-Q., Xin, X. Review on research of global major disaster event related port and shipping operation and management. (2023) *Jiaotong Yunshu Gongcheng Xuebao/Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 23 (5), pp. 1-18. doi:10.19818/j.cnki.1671-1637.2023.05.001
- 24.Chen, C. I. T., Sun, E. W., Lin, Y.-B. (2024) Coordinating spatio-temporal coupling with digital twin for sequential travel time prediction and intelligent routing . *Annals of Operations Research*
- 25.Shao, F., Ho, L.-Y., Wu, J.-J., Liu, P. (2015) Efficient distributed maximum matching for solving the container exchange problem in the maritime industry. *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Big Data, IEEE Big Data 2015*, art. no. 7363856, pp. 1031- 1036. doi: 10.1109/BigData.2015.7363856
- 26.Sharko O., Buketov A., Klevtsov K., Saponov O., Akimov O. (2023) Modeling of transport and logistics schemes of freight transportation under global risks. *Problems of friction and wear*. №3 (100), C.94-105. doi: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.117-132
- 27.Paardenkooper, K. (2022) The Role of Data-Driven Logistics in Arctic Shipping. *Contributions to Management Science*, pp. 173-191. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92291-7_10
- 28.Sharko M.V., Obolontseva O.A. Theoretical foundations of the conceptual and terminological apparatus of competitiveness [Theoretical foundations of the conceptual and terminological apparatus of competitiveness]. *Economics, finance, law*, 8-11.
- 29.Wu, H., Li, X., Wang, C., Ye, Z. (2024) Inverse calculation of vessel emission source intensity based on optimized Gaussian puff model and particle swarm optimization algorithm. *Marine Pollution Bulletin*, 209, art. no. 117117. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117117>
- 30.Xu, Z., Zheng, C., Zheng, S., Ma, G., Chen, Z. (2024) Optimization of multimodal routes for emergency supply transportation under uncertain conditions. *Sustainability (Switzerland)* , 16 (24), art. no.

10905. URL: <https://doi.org/10.3390/su162410905>

31.Liang, S., Dai, Y., Zhong, L., Gong, G. (2024) Robust optimization of seasonal multimodal cold chain transportation under uncertainty of transit time. ACM International Conference Proceedings Series, pp. 354-362. URL: <https://doi.org/10.1145/3695652.3695677>

32.Melnyk, O., Onyshchenko, S., Rudenko, S., Pavlova, N., Arsen Muradian (2024) Embracing Integrated Optimization Strategies for Cost-Effective Port Operations in Marine Logistics. Studies in Systems, Decision and Control, 561, pp. 491-508. doi: [10.1007/978-3-031-68372-5_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_27)

33.Babica, V., Sceulovs, D., Rustenova, E. (2020) Digitalization in Maritime Industry: Prospects and Pitfalls. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure, Part F1382, pp. 20-27. doi:[10.1007/978-3-030-39688-6_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_4)

34.Mouschoutzi, M., Ponis, S.T. (2022) A comprehensive literature review on spare parts logistics management in the maritime industry. Asian Journal of Shipping and Logistics, 38 (2), pp. 71-83. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.12.003>

35.Boto-Giralda, D., Diez-Higuera, J.F., Diaz-Pernas, F.J., Perozo-Rondon, F.J., Picón-Torres, A., Martinez-Zarzuela, M., Antón-Rodríguez, M., González-Ortega, D., Torre-Diez, I. (2012) Plataforma Integra de Gestión Logística de Transportes IDGLOTRANS. Proceedings of the 6th Euro-American Conference on Telematics and Information Systems, EATIS 2012, art. no. 6218035. URL: <https://doi.org/10.1145/2261605.2261649>

36.Fernandez-Isabel, A., Fuentes-Fernandez, R. (2015) Analysis of intelligent transport systems using model-based simulation. Sensors (Switzerland), 15(6), pp. 14117-14141. URL: <https://doi.org/10.3390/s150614116>

37.Xu, X., Lin, T., Wang, S., Rodriguez, L.F. (2017) A cyberGIS approach to uncertainty and sensitivity analysis in biomass supply chain optimization. Applied Energy, 203, pp. 26-40. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.107>

38.Li, X., Xu, Q., Chen, C., Yang, B., Jiang, Y., Zhu, S., Guan, X. (2024) Robust Cyber-Physical Co-Planning for Multienergy Ship Operation Under Multidimensional Uncertainties. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 10 (4), pp. 7852-7861. doi: [10.1109/TTE.2024.3403718](https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3403718)

39.Koola, P.M. (2018) Cybersecurity: A deep dive into the abyss. Marine Technology Society Journal, 52 (5), pp. 31-43. doi: [10.4031/MTSJ.52.5.2](https://doi.org/10.4031/MTSJ.52.5.2)

40.Fiorini, M., Gupta, N. (2021) ICT solutions and digitalisation in ports and shipping. ICT Solutions and Digitalisation in Ports and Shipping, pp. 1-460. doi: [10.1049/PBTR030E](https://doi.org/10.1049/PBTR030E)

41.Stępień, B. (2025) Defending the fleet: Cybersecurity and autonomous ships. 40 Years of the United Nations Convention on the Law of the Sea: Assessment and Prospects, pp. 334-344. doi: [10.4324/9781003492566-33](https://doi.org/10.4324/9781003492566-33)

42.Symes, S., Blanco-Davis, E., Graham, T., Wang, J., Shaw, E. (2024) The survivability of autonomous vessels from cyber-attacks. Journal of Marine Engineering and Technology. doi: [10.1080/20464177.2024.2428022](https://doi.org/10.1080/20464177.2024.2428022)

43.Samonte, M.J.C., Laurenio, E.N.B., Lazaro, J.R.M. (2024) Enhancing Port and Maritime Cybersecurity Through AI - Enabled Threat Detection and Response. 2024 8th International Conference on Smart Grid and Smart Cities, ICSGSC 2024, pp. 412-420. doi: [10.1109/ICSGSC62639.2024.10813774](https://doi.org/10.1109/ICSGSC62639.2024.10813774)

44.Shah, I.A. (2024) Autonomous Shipping: Security Issues and Challenges. Cybersecurity in the Transportation Industry, pp. 187-210. doi: [10.1002/9781394204472.ch9](https://doi.org/10.1002/9781394204472.ch9)

45.Shapo, V., Levinskyi, M. (2021) Means of Cyber Security Aspects Studying in Maritime Specialists Education. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1192 AISC, pp. 389-400. doi: [10.1007/978-3-030-49932-7_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49932-7_38)

46.Veres, P., Bagnay, T., Illes, B. (2017) Intelligent Transport Systems to Support Manufacturing Logistics. Lecture Notes in Mechanical Engineering , Part F12, pp. 245-256. doi: [10.1007/978-3-319-51189-4_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51189-4_24)

47.Yang, Y., Deng, H., Li, Q. (2021) Artificial Intelligence Path Search Technology Based on Marine Safety Big Data of Ships. Lecture Notes in Electrical Engineering, 747, pp. 973-980. doi:[10.1007/978-3-319-51189-4_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51189-4_24)

48.Arumugam, M., Parasuraman, K. (2023) Optimized Routing and Security in Maritime Safety Applications. Proceedings of the International Conference on Circuit Power and Computing Technologies, ICCPCT 2023, pp. 1636-1641. doi: [10.1109/ICCPCT58313.2023.10245423](https://doi.org/10.1109/ICCPCT58313.2023.10245423)

49.Nguyen, S., Leman, A., Xiao, Z., Fu, X., Zhang, X., Wei, X., Zhang, W., Li, N., Zhang, W., Qin,

- Z. (2023) Blockchain-Powered Incentive System for JIT Arrival Operations and Decarbonization in Maritime Shipping. Sustainability (Switzerland), 15 (22), art. no. 15686. doi: [10.3390/su152215686](https://doi.org/10.3390/su152215686)
- 50.Jaques, L.B.A., Coradi, P.C., Lutz, E., Teodoro, P.E., Jaeger, D.V., Teixeira, A.L. (2023) Nondestructive Technology for Real-Time Monitoring and Prediction of Soybean Quality Using Machine Learning for a Bulk Transport Simulation. IEEE Sensors Journal, 23 (3), pp. 3028-3040. doi: [10.1109/JSEN.2022.3226168](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3226168)
- 51.Rana, M.E., Mothi, V. Cloud Computing as an Enabler in the Mobile Application Domain (2022) 2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry, ICDABI 2022, pp. 184-189. doi: [10.1109/ICDABI56818.2022.10041462](https://doi.org/10.1109/ICDABI56818.2022.10041462)
- 52.Wang, B., Reinke, D., Wang, Y. (2024) Artificial intelligence frontiers in transportation. TR News, (348), pp. 17-21. URL: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews348AI.pdf>
- 53.Mishra, J., Dash, S.K., Dash, S. (2012) Mobile-cloud: A framework of cloud computing for mobile application. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, 86, pp. 347-356. doi: [10.1109/TSP52935.2021.9522673](https://doi.org/10.1109/TSP52935.2021.9522673)
- 54.Alshaikh, R., Ahmed, V., Bahroun, Z. (2023) Blockchain technology for traceability of hazardous material in seaports. Proceedings of International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE, 3, pp. 1366-1375.
- 55.Sarker, S., Henningsson, S., Jensen, T., Hedman, J. (2021) Use of blockchain as a resource for combating corruption in global shipping: an interpretive case study. Journal of Management Information Systems, 38 (2), pp. 338-373. doi: [10.1080/07421222.2021.1912919](https://doi.org/10.1080/07421222.2021.1912919)
- 56.Allen, D.W.E., Berg, C., Davidson, S., Novak, M., Potts, J. (2019) International policy coordination for blockchain supply chains. Asia and the Pacific Policy Studies, 6 (3), pp. 367-380. doi: [10.1002/app5.281](https://doi.org/10.1002/app5.281)
- 57.Shapo, V., Levinskyi, M. (2021) Means of cyber security aspects studying in maritime specialists education. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1192 AISC, pp. 389-400. doi: [10.1007/978-3-030-49932-7_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49932-7_38)
- 58.Chen, H., Wen, Y., Huang, Y., Xiao, C., Sui, Z. (2025) Edge Computing Enabling Internet of Ships: A Survey on Architectures, Emerging Applications, and Challenges. IEEE Internet of Things Journal, 12 (2), pp. 1509-1528. doi: [10.1109/JIOT.2024.3491162](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3491162)
- 59.Hao, J., Xian, M., Wang, H., Tang, F., Xiao, P. (2018) Mobile Cloud Computing: The State of Art, Application Scenarios and Challenges. International Conference on " Computational Intelligence and Communication Technology", CICT 2018, art. no. 8480365. doi: [10.1109/CIACT.2018.8480365](https://doi.org/10.1109/CIACT.2018.8480365)
- 60.Sahi, L., Sood, M., Saini, S. (2018) Analysis and Evaluation of Mobile Cloud Computing: Service Models, Applications, and Issues. 2018 4th International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2018, art. no. 9058061. doi: [10.1109/I2CT42659.2018.9058061](https://doi.org/10.1109/I2CT42659.2018.9058061)
- 61.Arun, C., Prabu, K. (2017) Applications of mobile cloud computing: A survey. Proceedings of the 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, ICI CCS 2017, 2018-January, pp. 1037-1041. doi: [10.1109/ICCONS.2017.8250623](https://doi.org/10.1109/ICCONS.2017.8250623)
- 62.Al-Tarawneh, A. (2024) Exploring the Nexus of Translation Studies and Artificial Intelligence in Logistics: A Review of Current Trends and Future Directions. Studies in Systems, Decision and Control, 226, pp. 857-867. doi: [10.1007/978-3-031-73545-5_75](https://doi.org/10.1007/978-3-031-73545-5_75)
- 63.Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., Łobodzińska, A., Kostecki, T. (2024) Harnessing AI for Sustainable Shipping and Green Ports: Challenges and Opportunities. Applied Sciences (Switzerland), 14 (14), art. no. 5994. doi: [10.3390/app14145994](https://doi.org/10.3390/app14145994)
- 64.Merli, M., Ciarapica, F.E., Varghese, K.C., Bevilacqua, M. (2024) Artificial Intelligence Approach to Business Process Re-Engineering the Information Flow of Warehouse Shipping Orders: An Italian Case Study. Applied Sciences (Switzerland), 14 (21), art. no. 9894. doi: [10.3390/app14219894](https://doi.org/10.3390/app14219894)
- 65.Capriglione, D., Carissimo, C., Milano, F., Sardellitti, A., Tari, L. (2024) Measurement and Applications: Artificial Intelligence in the Field of Measurement Applications. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 27 (4), pp. 29-36. doi: [10.1109/MIM.2024.10540394](https://doi.org/10.1109/MIM.2024.10540394)
- 66.Chen, Y. (2024) Research on Artificial Intelligence in the Maritime Field. AIP Conference Proceedings, 3194 (1), art. no. 050026. doi: [10.1063/5.0223123](https://doi.org/10.1063/5.0223123)
- 67.Li, Z., Fei, J., Du, Y., Ong, K.-L., Arisian, S. (2024) A near real-time carbon accounting framework for the decarbonization of maritime transport. Transportation Research Part E: Logistics and

Transportation Review, 191, art. no. 103724. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103724>

68.Kalghatgi, U.S. (2023) Creating Value for Reliability Centered Maintenance (RCM) in Ship Machinery Maintenance from BIG Data and Artificial Intelligence. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 104 (2), pp. 449-453. doi: [10.1007/s40032-022-00900-1](https://doi.org/10.1007/s40032-022-00900-1)

П. Мовчан, О. Шарко. Структурування основних напрямів досліджень, моделей та методів управління морським транспортом

Цей огляд має на меті виконати інтелектуальний аналіз різноманітних джерел, складених на основі сучасних наукових публікацій, галузевих і міжнародних конференцій, ринкової аналітики та тенденцій розвитку. Відзначено складність та фрагментарність тематики дослідження, пов'язану з невизначеністю впливу зовнішнього середовища на функціонування об'єктів транспортної інфраструктури та глобальними змінами структури відносин. Показано, що розвиток транспортної логістики характеризується тим, що одночасно з її концепцією відбувається процес розробки методологічних засад нових технологій управління інформаційним забезпеченням, обробкою та захистом інформації. Розглянуто сучасні технології створення інтелектуальних систем управління та вказано можливі напрями вдосконалення. Отримана інформація структурована в основу, на якій закладаються тренди розвитку логістики на морському транспорті: інтелектуальна автоматизація, робототехніка, аналітика великих даних, Інтернет речей, кібербезпека, хмарні платформи, блокчейн та штучний інтелект. З позицій морської транспортної логістики проаналізовано переваги, недоліки та напрямки раціонального використання запропонованої структуризації. Це дало змогу визначити перспективні напрямки наукових досліджень та створити основу для побудови концептуальних транспортних моделей у складних умовах експлуатації.

Ключові слова: морська транспортна логістика, тенденції розвитку, невизначеність, інтелектуалізація, менеджмент, структурування.

МОВЧАН Петро Віталійович, Аспірант Херсонської державної морської академії (м. Одеса), Україна e-mail: mpv01121988@gmail.com, ORCID: orcid.org/0009-0003-1004-6651

ШАРКО Олександр, доктор технічних наук, професор, Херсонська державна морська академія (м. Одеса), Україна, e-mail: avssharko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9025-7990

Petro MOVCHAN, Postgraduate, Kherson State Maritime Academy (Odessa), Ukraine, e-mail: mpv01121988@gmail.com, ORCID: orcid.org/0009-0003-1004-6651

Oleksandr SHARKO, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kherson State Maritime Academy (Odessa), Ukraine, e-mail: avssharko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9025-7990

DOI 10.36910/automash.v1i24.1708

Pelekh O.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ANALYSIS OF METHODS AND MODELS FOR STUDYING VEHICLE SUSPENSION SYSTEMS

The design of the car's suspension has the greatest impact on its performance properties: smooth ride, stability and handling. Increasing the smoothness of the ride provides comfortable sanitary conditions in the driver's and passengers' seats. As a rule, high smoothness of the ride can be achieved by reducing the rigidity of the elastic device and the damping coefficient of the shock absorber and, accordingly, increasing the suspension travel. Therefore, it is important to identify the disadvantages of different types of suspensions, classify them and further study their properties. In the development of technical solutions for the elements of the suspension systems of military vehicles and methods for studying the processes and states of operation of the suspension systems, there are a number of problems that need to be solved. This is the absence of an orderly system approach that comprehensively describes the process of choosing technical solutions for these elements based on the formulation of mathematical models describing processes and states for the synthesis of the structure and the selection of parameters. During the analysis, it was found that the existing mathematical models of processes and states are sometimes either unreasonably simplified or too cumbersome. An analysis of methods and models of research of car suspension systems has been carried out to determine the advantages and disadvantages of different types of suspensions. The analysis of suspensions (double-link, multi-link, adaptive, dependent, semi-dependent) was carried out on the following grounds: simplicity, compactness, reliability, noise and vibration insulation, controllability, the possibility of installing a drive axle, cheapness, cheap maintenance. They were classified as mechatronic systems: passive suspension systems, adaptive suspension systems, suspension systems with the ability to quickly adjust damper characteristics, slow-acting suspension systems, fully active suspension systems. The advantages and disadvantages of different types of suspensions are determined, their classification as mechatronic systems are necessary for subsequent modeling of operation and determination of operational properties.

Keywords: car suspensions, suspension systems, mechatronic systems, smoothness, research models.

INTRODUCTION

The design of a vehicle's suspension system has the greatest influence on its operational properties such as ride comfort, stability, and handling. Improving ride comfort means reducing the amplitude of vibrations and vibration acceleration at the driver's and passengers' seating points. Humans perceive vibrations of different frequencies differently; therefore, it is more important to dampen vibrations of certain frequencies over others. The characteristics of the sprung mass vibrations depend on the input effects (road micro-profile, vehicle speed) and the transfer function of the suspension, which is determined by the parameters of the elastic and damping elements. Generally, a high level of ride comfort can be achieved by reducing the stiffness of the elastic element and the damping coefficient of the shock absorber, along with increasing the suspension travel.

AIM AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The aim of this article is to analyze the methods and models used for studying vehicle suspension systems, to identify the advantages and disadvantages of different types of suspensions, and to classify them as mechatronic systems.

To achieve this, it is necessary to review and analyze the methods and models used for studying vehicle suspension systems, determine the strengths and weaknesses of different types of suspensions, and classify them to enable further modeling of their operation and evaluation of their performance characteristics.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

During the design of vehicle suspension systems, various research models and methods are applied and improved, with the goal of optimal suspension system design [1-11].

In [5], the influence of road characteristics on the parameters of the torsion suspension system of an electric vehicle was analyzed. These characteristics include the working travel of the suspension and the dynamic load on the wheel. Optimization of the main parameters of the torsion element was carried out.

Among other types of suspensions, systems with hydraulic shock absorbers are studied [12]. Hydraulic shock absorbers absorb significant power through the substantial increase in the dynamic travel of the suspension, which is not possible with conventional designs.

Reference [3] established that typical suspension systems cannot meet the stringent requirements posed to modern light armored vehicles (LAVs). The main contradictions encountered during synthesis are outlined, and possible ways to resolve these contradictions in suspension design are discussed.

Works [13,14,15] investigate the vertical vibrations of wheeled vehicles, identifying the conditions for the occurrence of resonance phenomena (the dependence of resonance amplitude on the restoring force of elastic dampers) for different types of suspensions.

In [16], a theoretical analysis of the influence of LAV suspension parameters on the oscillations of the vehicle body along with its weaponry was conducted. A comparison between linear and nonlinear suspension system characteristics is presented, based on the efficiency criterion for shooting performance.

Based on the conducted review, it was found that the existing theoretical foundation for solving the problems of parametric synthesis of suspension systems is incomplete. Available mathematical models require further improvement.

Papers [15-17] consider mathematical and physical models of dynamic suspension processes. Based on the mathematical models described in [18,19], a system of differential equations representing the suspension processes is formulated. The difference between the models in [17] and [18,19] lies in the additional generalized coordinates and the description of the elastic and damping connections between suspension elements.

The input data is the mass-geometric characteristics of the car, the design of the suspension and its elements, driving modes, road profile, etc., and the result is acceleration, speed, movement, power parameters of the suspension and body.

In [20], a mathematical model describing the dynamics of the "suspension-body-combat module" system was proposed. A key feature of this model is the ability to account for parametric dependencies of the coefficients in the system of algebraic-differential equations on the generalized parameters of a specific vehicle suspension. The model output provides a parametric relationship between the system's dynamic variables and a set of critical parameters.

Parametric and structural optimization, as well as the synthesis of new physical principles for the operation of suspension system components, are considered in [21]. A mathematical model was developed to study the stress-strain state of a vehicle body. Its distinctive feature compared to other models is the structural formulation of the problem, allowing the derivation of design solutions based on the analysis of the stress state simulation results under firing conditions and specified variations of a defined set of design parameters. This approach is also applied to problems involving periodic impulse loads for analyzing strength and stiffness characteristics.

In [22], it is noted that when formulating mathematical models of dynamic processes in military vehicles, two components must be considered: the continuous and the discrete. The first is used for modeling the stress state of the light armored vehicle (LAV) body, and the second for modeling the equipment, suspension, and tires. This enables the solving of dynamic process analysis tasks in LAV bodies. By combining the finite element method and the generalized parametric modeling method, a technique for creating a set of parametric models of dynamic processes in LAV bodies is presented in [22].

In [4], models and research methods are described that allow for the development of recommendations regarding design solutions for LAV suspension systems. Traditional modeling methods [23] generally analyze the stress state of a torsion bar. Improved computational schemes combined with the finite element method are commonly used when analyzing the torsion bar foundation. The paper presents the task of improving algorithms, models, and methods for studying the stress state of the torsion bar, considering elastic-plastic deformation throughout the entire structure. A generalized parametric approach based on the methods of variational inequalities theory, elastic-plastic deformation, and finite element techniques was adopted. The resulting model is parametric.

To this day, the oscillatory effect of the vehicle body remains a significant problem for the automotive industry. This effect can occur when a vehicle moves over uneven surfaces or when disturbances are generated by an installed weapon system. Under the influence of body oscillations, the vehicle may behave unpredictably, potentially leading to accidents.

A significant number of studies by national scientists [17;18;24] have been devoted to determining the oscillatory capabilities of a vehicle's sprung masses. Based on the analysis of available literature and publications, calculation methods for the stiffness of sprung masses for major types of suspensions were reviewed. Existing methods for calculating the oscillations of vehicle sprung masses generally do not consider the vehicle being in a static state. Changes in the design of modern vehicles, both domestic and

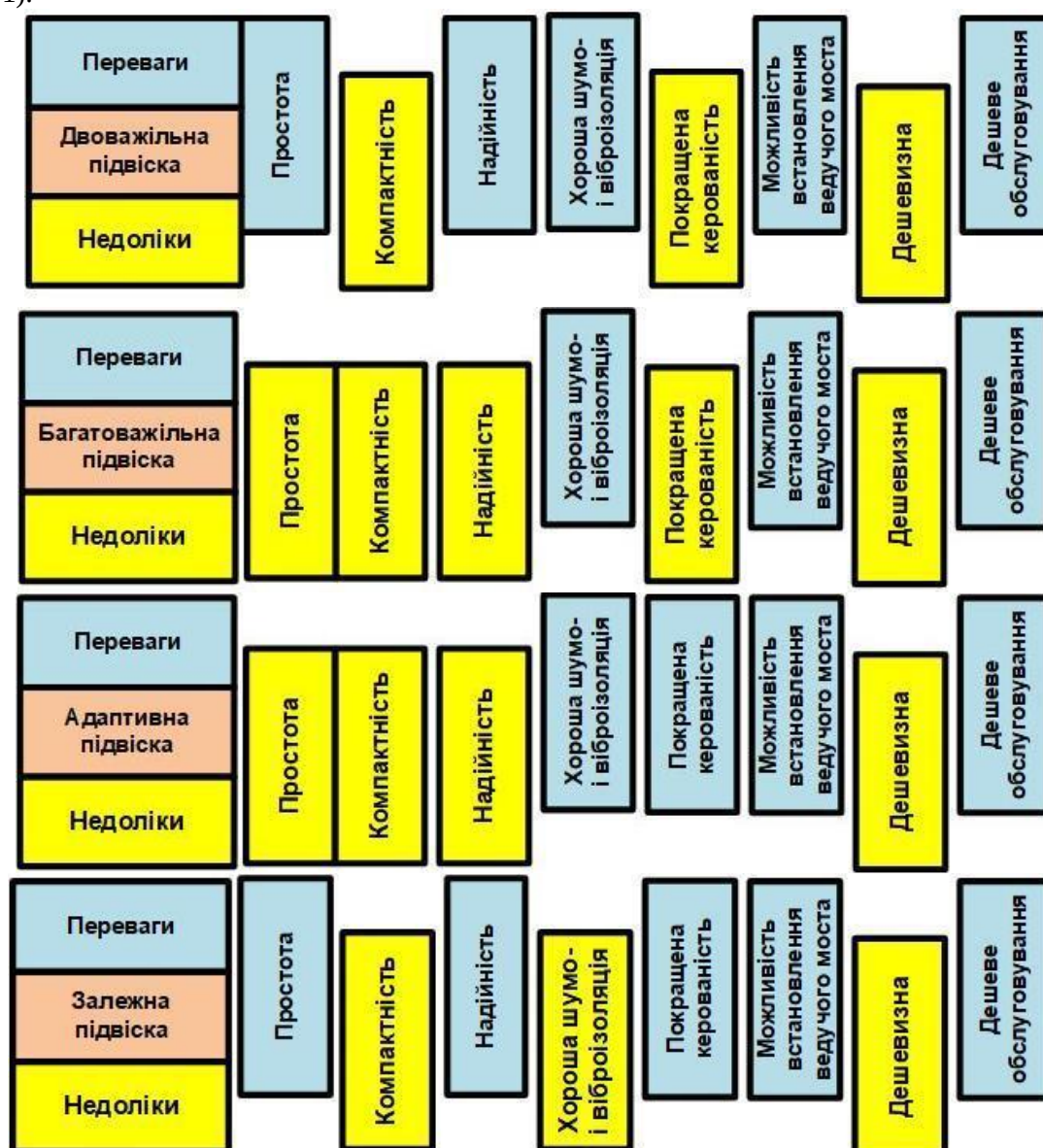
foreign, were analyzed [19;23]. The shift in the center of gravity depending on the tactical and technical characteristics of installed non-standard weapon systems was also studied [16;21].

RESEARCH RESULTS

The conducted review highlighted the relevance of the body oscillation problem and emphasized the need for solutions to reduce its impact on vehicle movement. The findings also confirm the importance of research aimed at developing new technologies to enhance vehicle safety and ensure the effective use of mounted weapon systems.

Mathematical models are used to investigate the influence of suspension parameters on vehicle body oscillations along with equipment loads. It is particularly important to determine resonance phenomena that affect the strength characteristics of vehicle elements, especially the body. Tasks involving periodic impulse loads are critical, as they have a significant impact on the vehicle's reliability.

Different designs offer various advantages and disadvantages. These can be categorized into constructive (simplicity, compactness, good noise and sound insulation, ability to install a front driving axle), operational (improved handling, low-cost maintenance), and economic (low manufacturing cost) aspects (Figure 1).



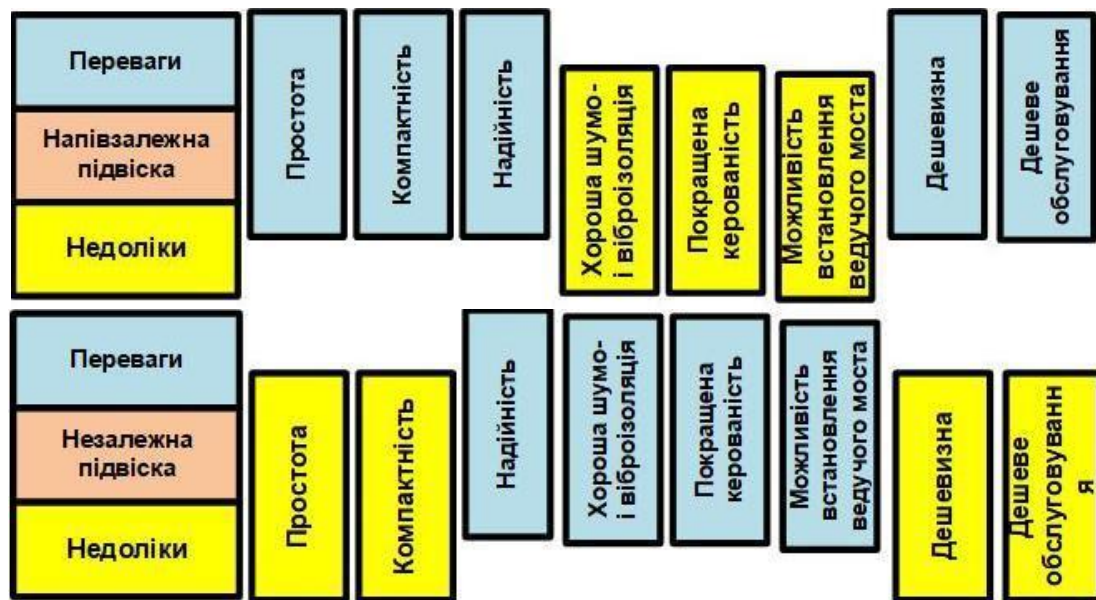


Figure 1 – Advantages and Disadvantages of Different Types of Suspensions

Mechatronic suspension systems can be classified according to the types of actuators they use, including actuator bandwidth, power consumption, and control range, that is, the limits of the forces generated by the actuators. Accordingly, mechatronic suspension systems can be divided into five groups:

1. Passive Suspension Systems (Figure 2) operate quasi-statically, maintaining a constant distance between the chassis and the road to compensate for different vehicle load levels. The leveling system may be based on air springs and compressors. Thus, a soft, comfort-oriented suspension setup with sufficient travel can be achieved regardless of the vehicle load level. Their power consumption typically ranges between 100–200 W.

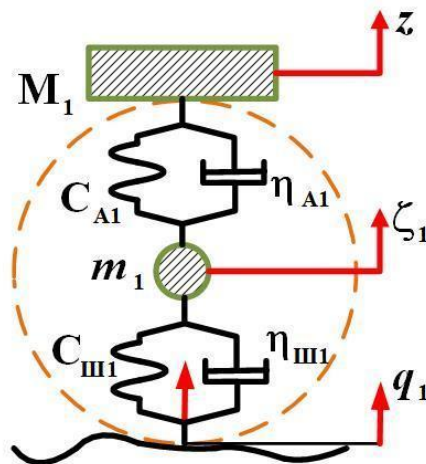


Figure 2 – Model of a Passive Suspension System

where: M_1 – sprung mass per wheel; m_1 – unsprung mass per wheel; C_{III1} – vertical stiffness coefficient of the tire; C_{PI1} – vertical stiffness coefficient of the suspension spring element; η_{A1} – damping coefficient of the suspension damper; η_{III1} – damping coefficient of the tire; z – vertical position of the vehicle's center of mass per wheel; ζ_1 – vertical position of the unsprung mass; q_1 – real-time ordinate value of the road microprofile at the wheel contact.

2. Adaptive Suspension Systems (Figure 3) are defined in the literature as systems that slowly adjust the characteristics of springs and dampers. Changes are planned, for example, depending on the vehicle speed to lower the center of gravity for more sporty road holding. Their energy consumption mainly depends on the energy required to change the spring stiffness. This thesis presents adaptive suspension control concepts aimed at achieving high dynamic adaptability to current driving conditions.

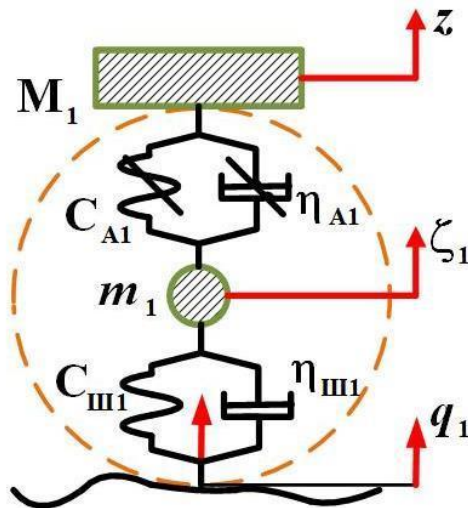


Figure 3 – Model of an Adaptive Suspension System

where: $C_{ш1}$ – variable vertical stiffness coefficient of the suspension spring element; η_{A1} – variable damping coefficient of the suspension damper.

3. Semi-Active Suspension Systems (Figure 4) are capable of quickly adjusting damper or spring characteristics. A main attribute of semi-active systems is that the force generated by the semi-active element depends on the direction of relative movement. Semi-active dampers can adjust energy dissipation levels but cannot inject energy into the system. Accordingly, they have very low power consumption, about 20–40 W per damper. Their bandwidth reaches up to approximately 40 Hz. An example is the ZF Lemforder GmbH semi-active anti-roll bar with switchable additional springs.

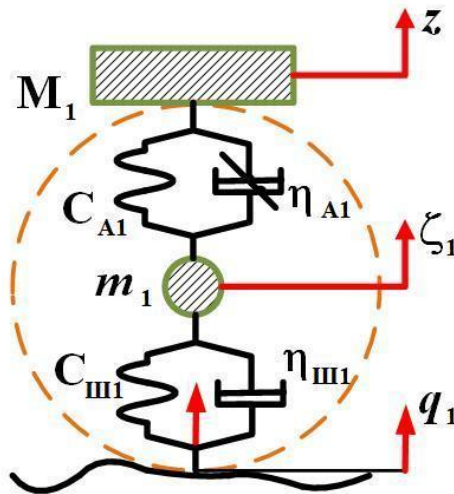


Рисунок 4 – Модель напівактивної системи підресорювання де η_{A1} – Figure 4 – Model of a Semi-Active Suspension System where: η_{A1} – variable damping coefficient of the suspension damper.

4. Slowly Active Suspension Systems (Figure 5) (also called low-bandwidth active systems) represent a class of active suspensions characterized by an additional actuator (e.g., an electric linear motor or a hydraulic cylinder) integrated into the suspension to generate suspension forces independently of the relative motion between the chassis and the wheel. The bandwidth of these systems is about 5 Hz. Typically, actuators are serially connected with the primary spring and may tend to "amplify" if bandwidth is exceeded. Their power requirements are about 1–5 kW.

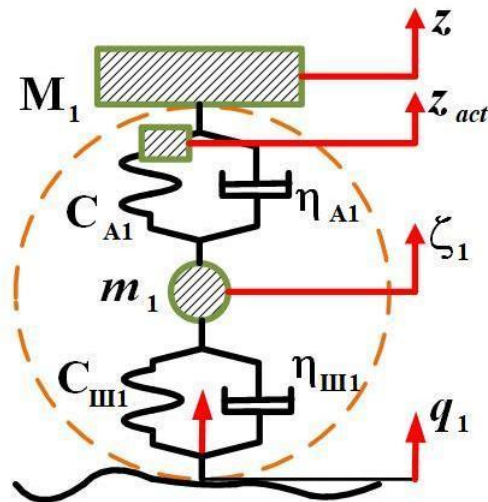


Figure 5 – Model of a Slowly Active Suspension System
where: z_{act} – displacement of the active element.

5. Fully Active Suspension Systems (Figure 6) (high-bandwidth active systems) replace or supplement the passive damper with an actuator capable of operating at 20 Hz or higher. Actuators are mounted in parallel with the primary spring, and passive dampers may sometimes be absent (though they might still be included in the mathematical model to account for frictional effects). A major drawback is their high energy consumption, ranging from 4 to 20 kW. Examples of active elements include pneumatic cylinders or springs with variable stiffness.

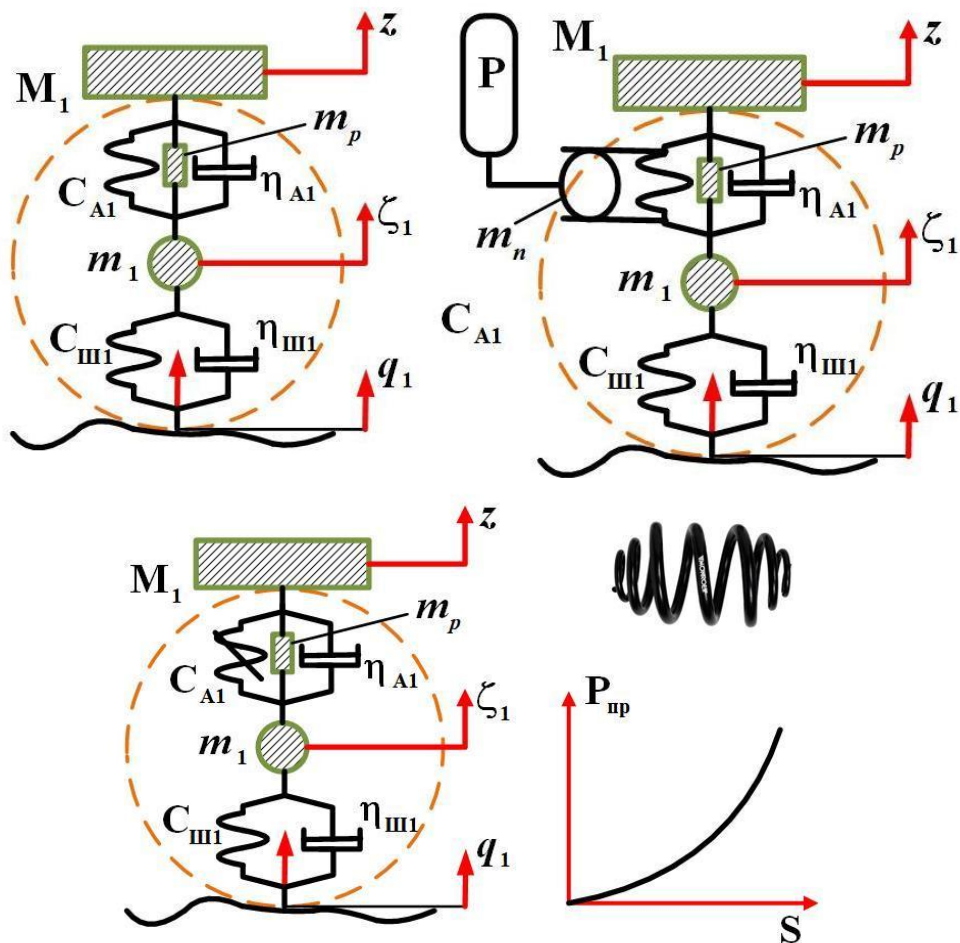


Figure 6 – Model of a Fully Active Suspension System
where: m_p – active element of the suspension system.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

One possible solution to reduce the body oscillation effect is the use of active suspension systems, which can react to changes in road conditions and compensate for body oscillations, although they do not account for disturbances caused by installed equipment (such as weaponry on military vehicles). Possible solutions include optimizing suspension system parameters or using special materials for suspension elements and reducing body mass.

The oscillation effect remains a relevant research problem for the development of technologies that can minimize its impact on vehicle movement. Further research is needed to study the influence of various factors on vehicle body oscillations and to develop new methods and technologies for their mitigation.

In the development of improved technical solutions for military vehicle suspension elements and the research methods for suspension system processes and states, several problems have been identified. These include the lack of a systematic approach for selecting technical solutions based on mathematical modeling for the synthesis of suspension structures and parameter selection. Current models are often either overly simplified or too complex. Furthermore, analysis and synthesis tasks are not integrated into a generalized parametric framework that should cover both the choice of suspension elements and operating modes, as well as material properties and technical performance requirements.

CONCLUSIONS

An analysis of research methods and models for automotive suspension systems was conducted to identify the advantages and disadvantages of different types of suspensions and classify them as mechatronic systems. Advantages and disadvantages of various suspension types were determined, and a classification was proposed for further modeling and evaluation of operational properties.

REFERENCE

1. Brul S.T., N.A. Tkachuk, A.Yu. Vasiliev, I.N. Karapeychik. Modeling of physical and mechanical processes in the hulls of light armored vehicles: approaches, models, effects. *Mechanics and Machine Building*. 2011. No. 1. P. 66–73.
2. Muhammad Haroona, Douglas E. Adams, Yiu Wah Luk, Aldo A. Ferri. A time and frequency domain approach for identifying nonlinear mechanical system models in the absence of an input measurement. *Journal of Sound and Vibration*. 283 (2005). P. 1137–1155.
3. Dushchenko V.V. Suspension systems of military and wheeled vehicles: calculation and synthesis: textbook. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. 336 p.
4. Grabovsky A.V., M.M. Tkachuk, A.V. Zavorotny, S.V. Kutsenko, M.S. Saverska, I.Ye. Klochkov, M.A. Tkachuk, O.I. Zinchenko, R.P. Derevyankin. Contact interaction of a torsion shaft with a splined sleeve under elasto-plastic deformations. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems*. Kharkiv, NTU "KhPI". 2021. No. 1. P. 34–46.
5. Shui-Ting Zhou, Yi-Jui Chiu, I-Hsiang Lin. The parameters optimizing design of double suspension arm torsion bar in the electric sight-seeing car by random vibration analyzing method. *Shock and Vibration*, vol. 2017(22), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/8153756>.
6. Wang R.L., J.Z. Zhao, G.Y. Wang, X.K. Chen, L. Li. Modeling and kinematics simulation analysis of conventional suspension with double trailing arms for light off-road vehicles. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 312, pp. 673–678.
7. Tian G., Y. Zhang, J.-H. Liu, X.-J. Shao. Double wishbone independent suspension parameter optimization and simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 574, pp. 109–113.
8. Cherian V., I. Haque, N. Jalili. Development of a non-linear model of a double wishbone suspension for the characterization of force transmission to the steering column and chassis. *Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE*, pp. 775–780, Anaheim, CA, USA, November 2004.
9. Mohamad N., Farhang K. A vibration model of a suspension–tire system. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 2B, pp. 1465–1476. Salt Lake City, Utah, USA, 2004.
10. Balike K.P., Rakheja S., Stiharu I. Development of a kineto-dynamic quarter-car model for synthesis of a double wishbone suspension. *Vehicle System Dynamics*. 2011, vol. 49, no. 1–2, pp. 107–128.
11. Zhao L., S. Zheng, J. Feng, Q. Hong. Dynamic structure optimization design of lower control arm based on ESL. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2012, vol. 4, no. 22, pp. 4871–4878.

12. Dushchenko V.V., S.M. Vorontsov, R.A. Nanivskyi. Study of energy losses in the suspension shock absorbers of the BTR-4 armored personnel carrier and assessment of the feasibility of applying an energy recovery system. Military Technical Collection of the National Academy of Ground Forces named after Hetman Petro Sahaidachnyi. 2020. No. 23. P. 40–49.
13. Sokil B.I., R.A. Nanivskyi, Grubel M.G. Natural vertical oscillations of a vehicle body considering the nonlinear characteristics of the elastic suspension. Automotive Transport: scientific-industrial journal. 2013. No. 5 (235). P. 15–18.
14. Grubel M.G., O.P. Krasnyuk, M.B. Sokil, R.A. Nanivskyi. Vertical oscillations of the sprung mass of wheeled vehicles under random disturbances. Scientific Notes: Collection of scientific papers; Lutsk National Technical University, Lutsk. 2014. Issue 46. P. 112–116.
15. Grubel M.G., R.A. Nanivskyi, M.B. Sokil. Resonant oscillations of the sprung mass of wheeled vehicles when moving along an ordered system of irregularities. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. 2015. No. 1. P. 155–161.
16. Tkachuk P.P., M.G. Grubel, M.B. Sokil, R.A. Nanivskyi. Evaluation of the impact of nonlinear suspension force characteristics on the firing efficiency of wheeled combat vehicles. Military Technical Collection of the National Academy of Ground Forces named after Hetman Petro Sahaidachnyi. 2016. No. 15. P. 42–47.
17. Malakey A.N. Mathematical model of dynamic processes in the body and running gear of a light-armored wheeled combat vehicle. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems. Kharkiv, NTU "KhPI". 2005. No. 60. P. 98–120.
18. Sokil B.I., R.A. Nanivskyi, M.G. Grubel. Natural vertical oscillations of a vehicle body considering the nonlinear characteristics of the elastic suspension. Avtoshlyakhovyk Ukrainy: scientific and industrial journal. No. 5 (235), p. 15–18. 2013.
19. Alexandrov E.E., Vorontsov S.N., Karpenko V.A., et al. Mathematical modeling of random road microprofile using a computer. Bulletin of KhGPU. 1999. Issue 60. P. 36–39.
20. Melnyk B.A., A.N. Malakey, D.S. Mukhin, A.Yu. Tanchenko, O.V. Kokhanovska. Mathematical and numerical modeling of dynamic processes in the elements of light-armored combat vehicles. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems. Kharkiv, NTU "KhPI". 2013. No. 1(975). P. 93–117.
21. Nabokov A.V., N.A. Tkachuk, A.N. Malakey, A.V. Grabovsky, A.Yu. Vasiliev, S.V. Kutsenko, A.Yu. Tanchenko, E.S. Ananyin. Mathematical modeling of dynamic processes in the body of a light-armored vehicle under pulse loading. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems. Kharkiv, NTU "KhPI". 2018. No. 7(1283). P. 76–85.
22. Tkachuk M.A., A.V. Nabokov, A.V. Grabovsky, O.M. Rikunov, M.M. Tkachuk, S.I. Marusenko, I.Ya. Khramtsova, O.V. Kokhanovska, M.V. Prokopenko, O.S. Loznyi, Y.S. Chala. Analysis of the response of test spatial structures of light armored vehicle bodies under series of pulse impacts. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Machine Science and CAD Systems. Kharkiv, NTU "KhPI". 2020. No. 2. P. 117–139.
23. DJiang, C.Pierre, S.W.Show. Large-amplitude non-linear normal modes of piecewise linear systems // Journal of Sound and Vibration. - 272. - 2004. - P. 869-891.

Пелех О. Р. Аналіз методів та моделей досліджень систем підресорювання автомобілів

Конструкція підвіски автомобіля має найбільший вплив на такі його експлуатаційні властивості: плавність ходу, стійкість і керованість. Підвищення плавності ходу забезпечує комфортні санітарні умови на місцях водія та пасажирів. Як правило, висока плавність ходу може бути досягнута зниженням жорсткості пружного пристрою і коефіцієнта демпфірування амортизатора і, відповідно, збільшенням ходу підвіски. Тому важливим є визначенні недоліків різних типів підвісок, їх класифікація і подальше дослідження їх властивостей.

При розробках по вдосконаленню технічних рішень елементів систем підресорювання військових автомобілів та методик дослідження процесів і станів роботи систем підресорювання існує ряд проблем, що потребують вирішення. Це відсутність впорядкованого системного підходу, який всесторонньо описує процес вибору технічних рішень цих елементів на основі формулювання математичних моделей опису процесів і станів для проведення синтезу структури і вибору параметрів. При аналізі встановлено, що наявні математичні моделі процесів і станів деколи є або необґрунтовано спрощеними, або занадто громіздкими.

Проведено аналіз методів та моделей досліджень систем підресорювання автомобілів для визначення переваг та недоліків різних типів підвісок. Проведено аналіз підвісок (двоважільна, багатоважільна, адаптивна, залежна, напівзалежна) за ознаками: простота, компактність, надійність, шумо- і віброізоляція, керованість, можливість встановлення ведучого моста, дешевизна, дешеве обслуговування. Здійснена їх класифікація як мехатронних систем: пасивні системи підвісок, адаптивні системи підвіски, підвісні системи з можливістю швидкого регулювання характеристик демпфера, повільно активні системи підвісок, повністю активні системи підвісок

Визначені переваги та недоліки різних типів підвісок, їх класифікація як мехатронних систем необхідні для послідуячого моделювання роботи і визначення експлуатаційних властивостей.

Ключові слова: підвіски автомобіля, систем підресорювання, мехатронні системи, плавність ходу, моделі досліджень.

ПЕЛЕХ Олексій Романович, аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: oleksii.r.pelekh@lpnu.ua, ORCID: 0009-0007-8410-9431.

Oleksiy PELEKH, Postgraduate Student of the Department of Machine Design and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, e-mail: oleksii.r.pelekh@lpnu.ua, ORCID: 0009-0007-8410-9431.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1709

УДК 519.876.5:629.33
UDC 519.876.5:629.33

Pustiulha S.I., Samchuk V.P., Holovachuk I.P., Prystupa O.V., Lelyk Ja.R.
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING FRACTAL DIMENSION AS A TOOL FOR ENHANCING PERFORMANCE AND SAFETY CHARACTERISTICS OF AUTOMOTIVE TRANSPORT OBJECTS

This paper is devoted to developing a concept for the effective utilization of methods for analyzing and calculating the fractal dimension of models in two-, three-, and multidimensional spaces aimed at solving practical problems related to enhancing qualitative characteristics of automotive transport objects, transport infrastructure, and logistics. The most universal and computationally efficient method for calculating fractal parameters has been identified, opening new possibilities for optimizing modeling processes of real systems and significantly improving the quality of their analysis and forecasting.

Contemporary applied tasks, including those in transportation technologies, are actively progressing towards investigating processes within multidimensional spaces related to the dynamics of chaotic systems behavior. Searching for universal methods and algorithms to calculate fractal parameters for multiparametric object models within arbitrary-dimensional spaces, particularly those changing their properties over time, requires additional research for generalization.

The analysis of literature sources revealed that previous research still contains several unresolved issues regarding fractal analysis. These formed the basis for formulating the tasks addressed in this paper, including classification of methods for calculating fractal dimension as tools for solving practical problems across various scientific and technological fields; investigation of computational algorithms for determining fractal parameters of objects concerning their potential for generalization and use in spaces of arbitrary dimensionality; and identification of interdependencies and interrelations between fractal parameters of quasi-fractal and multifractal computational models and the technological, technical, and economic characteristics of objects and processes within the automotive industry. Based on these, ways to develop a practical method for calculating and analyzing fractal objects, characterized primarily by universality and standardization, have been outlined.

The research carried out in this study regarding the capabilities of the analyzed methods for calculating fractal dimensions, their classification according to defining characteristics, and the analysis of their algorithmic foundations led to the conclusion that the Box-Counting Method is the most effective and universal. It enables clear visualization of geometric complexity in models and their self-organization. The algorithm of this method is relatively simple and allows quantitative assessment of the hierarchical order and structural chaos level in studied objects, directly influencing accurate determination of relationships between fractal parameters and technological properties of real physical phenomena and processes.

A concept for improving the most universal Box-Counting method is proposed, with outlined directions for extending and deepening its theoretical, methodological, and algorithmic components. The idea of calculating fractal parameters for object models in spaces of arbitrary dimensions through continuous dimensionality reduction is introduced. Practically, this procedure resembles gradual stratification of a multidimensional object into separate layers of varying dimensionality, determining fractal parameters of these layers, and consolidating geometric data into a unified information framework. Such fractal scanning allows for adjusting individual layers, elements, or nodes within the model to further improve its technological and technical properties.

Keywords: fractal dimension, technological and performance characteristics of transport objects, multidimensional space, concept of interrelation between geometric parameters and qualitative properties of transport infrastructure objects.

INTRODUCTION

Modern scientific research in geometric analysis and modeling of complex systems increasingly utilizes the concept of fractal dimension. This is due to the inadequacy of traditional Euclidean models for accurately describing structures characterized by irregular, self-organized, or chaotic patterns. Fractal characteristics provide a more precise determination of geometric properties for such objects in two- and three-dimensional spaces, opening broad prospects for optimizing their technological qualities in various fields of science and engineering [1]. Particularly, in engineering, physics, biology, computer modeling, and materials science, fractal dimension is employed for analyzing complex surfaces, porous structures, turbulent flows, transport network quality, and even economic processes.

A significant challenge in solving this diverse range of practical problems is reducing the numerous research methods and tools for studying fractal properties of specific objects or phenomena to as few as possible. Therefore, a critical analysis of the most popular methods for calculating fractal dimensions, identifying their universal characteristics, classifying them, and seeking standardized algorithmic and software approaches for effective practical application constitute the primary relevant task. Moreover, it is crucial to consider that, for practical applications, correctly identifying the interrelation between fractal

parameters and technological properties of the objects studied is even more important than the accuracy of calculating fractal characteristics themselves.

Additionally, contemporary applied tasks, including those in the field of transportation technologies, increasingly focus on investigating processes in multidimensional spaces related to the dynamics of chaotic systems. Finding universal methods and algorithms for calculating fractal parameters of multiparametric object models within spaces of arbitrary dimensionality, particularly those whose properties may vary over time, requires further research for generalization. Consequently, analyzing existing methods, improving them, and adapting them for fractal calculation of multidimensional objects represents the second relevant task, holding significant potential for applications in automotive transport and logistics.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The search and analysis of literature sources regarding the aforementioned issues were conducted in the following directions: contemporary methods for calculating the fractal dimension of objects in two-dimensional and higher-dimensional spaces; approaches for evaluating geometric properties of internal, non-visible areas of spatial fractal structures; and interrelations and mutual influences of fractal parameters of investigated objects on the enhancement of their technological characteristics.

The study [2] investigates the efficiency of the perimeter-area method, introduced by Mandelbrot, for determining the fractal dimension of complex geometric objects such as aggregate clusters. The publication emphasizes the importance of correctly choosing internal and characteristic measurements when applying this method, particularly for cluster-type objects. However, while highlighting caution in applying the perimeter-area method to various object types, the work does not provide detailed recommendations for its use with other complex structures.

Multifractal objects are the subject of study in [3], where the authors explore two mass-oriented methods for calculating generalized fractal dimension, particularly for a one-dimensional generalized Cantor set. They demonstrate these methods provide more accurate results compared to the box-counting method. Although mass-oriented methods exhibited superior results in a specific case, the authors acknowledge the necessity for further research to determine their limitations and applicability to other types of fractal structures.

Work [4] presents a fractal dimension calculation method based on the box-counting approach, incorporating mathematical definitions for cell dimensions and intervals. The authors generate fractal objects and define cells according to mathematical principles, reducing errors associated with traditional approaches. Despite improved accuracy, further research is necessary to evaluate its effectiveness for complex natural objects and under noisy conditions.

Publication [5] investigates the use of correlation dimension estimation in simulated phase spaces to identify characteristic relations in various dynamic systems. The method is presented as a rapid and reliable tool for detecting causal interactions in systems dominated by deterministic dynamic processes. However, the method requires further validation with real data and under conditions where stochastic processes significantly influence system dynamics.

Study [6] focuses on examining the geometry of rain- and cloud-formed areas identified using satellite and radar data. The author employs area-perimeter relationships to analyze the fractal form of these regions, enhancing understanding of their properties and behavior. Although the research allows extracting geometric information of cloud and rain areas, it does not correlate these findings with parameters influencing climate models and forecasts.

The authors in [7] propose a three-dimensional box-counting method for analyzing fractal characteristics of modern urban structures. They applied this method to assess the two-dimensional and three-dimensional fractal properties of urban matrices, aiding in understanding the complexity and hierarchy of urban environments. The research investigated the impact of fractal dimension on urban infrastructure development, including transportation networks, and its potential use in sustainable urban planning. However, the effect of varying scales and data resolutions on analysis results was not considered, an aspect essential for practical applications in urban studies.

In [8], the authors developed a three-dimensional road surface model using the box-counting method to determine fractal dimensions of random height points on road pavements. This provided new parameters for assessing pavement conditions and their influence on vehicle dynamics. However, results did not integrate fractal parameters into practical applications nor linked them with existing road quality evaluation standards. The impact of different pavement types on analysis results was also not specified.

Publication [9] evaluates the efficiency of minimal coverage in calculating fractal dimensions for river network schemes on maps. The authors proposed a methodology allowing more precise fractal dimension

determinations, considering object complexity. However, detailed recommendations for automating minimal coverage, crucial for processing large datasets of river network imagery, were lacking. Additionally, generalizing results for spatial geometric structures of similar types proved challenging.

The literature analysis indicated several gaps that form the basis for defining the objectives of the current research. These include a lack of comprehensive approaches in the analyzed studies for using methods to calculate fractal properties of objects as numerical indicators of their qualitative and safety attributes; absence of research on calculating fractal characteristics independent of the modeling spaces; and undeveloped conceptual principles regarding interrelations and impacts of fractal properties on the technical quality of the analyzed processes.

RESEARCH AIM AND OBJECTIVES

The aim of this research is to develop a concept for effectively utilizing methods of analyzing and calculating the fractal dimension of models in two-, three-, and multidimensional spaces to solve practical tasks related to enhancing the qualitative characteristics of automotive transport objects, transport infrastructure, and logistics. Identifying the most universal and computationally efficient methods for calculating fractal parameters will open new opportunities for optimizing modeling processes of real systems and improving the quality of their analysis and forecasting.

To achieve this aim, the following objectives must be addressed:

1. Classify methods for calculating fractal dimension as tools for solving practical tasks in various fields of science and technology.
2. Investigate computational algorithms for determining fractal parameters of objects, focusing on their potential for generalization and application in spaces of arbitrary dimensionality.
3. Define the interrelations and mutual influences between fractal parameters of quasi-fractal and multifractal computer models and the technological, technical, and economic characteristics of automotive industry objects and processes. On this basis, outline the pathways for developing a practical method for calculations and analyses of fractal objects, characterized by universality and standardization in spaces of arbitrary dimensions.

The object of this research comprises methods for determining the fractal dimension of objects in spaces of arbitrary dimensionality.

The subject of the research is the specifics of applying fractal methods to analyze complex geometric models and their influence on assessing technological characteristics of studied objects (particularly automotive industry objects).

RESEARCH RESULTS

1. Classification of Methods for Calculating Fractal Dimension as Tools for Solving Practical Problems

Based on the analysis of contemporary approaches to calculating fractal dimensions and the defined research objectives, the methods are classified according to the following criteria: 1) complexity of method implementation and required computational resources; 2) dimensionality of the space in which fractal parameters of the object can be calculated using a specific method; 3) universality of the method and standardization of its calculation algorithms.

Classification based on the **complexity of method implementation and computational resources required** for practical use helps ensure optimal method selection depending on available computational capabilities, the type of input data, and the required accuracy.

Simple methods (Fig. 1) (low computational complexity). These methods are easy to implement and require minimal computational resources. They are suitable for processing small datasets or quick (approximate) estimates of fractal dimensions. Such methods primarily include:

– Box-Counting Method. The most widespread method, based on counting occupied and unoccupied cells after covering the object with grids of different scales. Easy to implement, this method is commonly used for analyzing the fractality of planar contours, textures, and porous structures, primarily in two-dimensional spaces.

– Perimeter-Area Method. Used for 2D objects, fractal dimension is evaluated through the perimeter-to-area ratio. Primarily applied to linear geometric figures, coastlines approximated by polygons, and various natural biological structures.

– Mass-Radius Method. This method assesses self-similarity in simple objects by analyzing the mass (number of zero-dimensional points) within circles of a certain radius. It is relatively easy to implement but requires effective selection of circle centers and result-averaging algorithms.

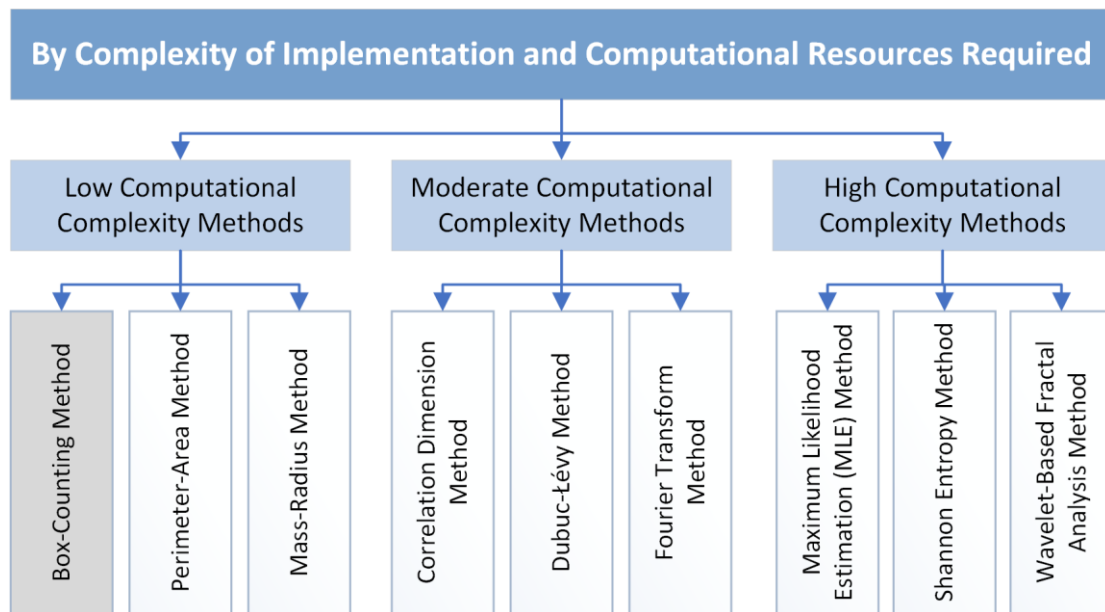


Fig. 1. Classification of fractal calculation methods by algorithm complexity

Moderately complex methods (Fig. 1). These methods require more complex algorithms, various statistical computations, or specific approaches to selecting parameters of studied objects:

- Correlation Dimension Method. Used to analyze interactions between fractal points through statistical correlations. The method involves calculating distances between large sets of points, complicating computations in large-scale systems. It can be used for chaotic system analysis, fluid dynamics, and clustering data in fractal models.
- Dubuc-Lévy Method. Determines local dimensions of objects by calculating scale variations for different regions. It is specialized and can be used for fractals with heterogeneous structures.
- Fourier Transform Method. Based on spectral analysis to estimate fractal properties. Requires continuous frequency data transformation, increasing complexity. Selectively applicable in physics, image processing, and fractal turbulent flow analysis.

Complex methods (Fig. 1) (high computational complexity). These methods are the most accurate for determining fractal dimensions but demand significant computational resources, specialized software, or machine learning:

- Maximum Likelihood Estimation (MLE Method). This method applies statistical approaches to estimate fractal structure distribution parameters. Suitable for analyzing biological systems or financial markets where calculation accuracy is crucial. However, it involves repeated probability distribution computations and complex optimization algorithms.
- Shannon Entropy Method. Uses entropy concepts to evaluate fractal dimensions, requiring calculations of multiple multidimensional probability distributions. Typically used only for neural networks analysis or signals with complex structures.
- Wavelet-Based Fractal Analysis Method. Employs wavelet transforms to analyze scale dependencies in fractal structures. Applied in medical research, turbulence analysis, and neuroscience. Although providing high accuracy, it demands extensive calculations and powerful computing hardware.

The classification provided is justified by enabling optimal method selection based on specific practical fractal analysis tasks, available computational resources, and accuracy requirements. Simple methods are preferable for quick assessments or limited computational capacities, while complex methods suit specialized scientific research requiring high precision. Using overly complex methods may lead to substantial time and resource expenses. Additionally, consideration should be given to the suitability of methods for discrete or continuous data.

Methods for calculating fractal dimensions should also be classified according to the **dimensionality of the space** containing the analyzed object. This criterion holds both theoretical and practical importance, as different methods vary in efficiency depending on the geometric characteristics of fractals and data acquisition capabilities for their analysis and comparison.

Methods for Analyzing Objects in One-Dimensional Space (Fig. 2) (Zero-Dimensional and One-Dimensional):

- Line-Counting Method. Divides linear structures into intervals. This method evaluates geometric characteristics of curves, fractal dimensions of coastlines, and curvilinear boundaries of fractals.
- Covering Method. Determines the minimal number of circles required to cover a fractal object. Frequently used in biology for analyzing vascular structures.

Both methods are straightforward and suitable for analyzing simple experimental data. However, their main drawbacks are limited applicability and difficulty in generalization.

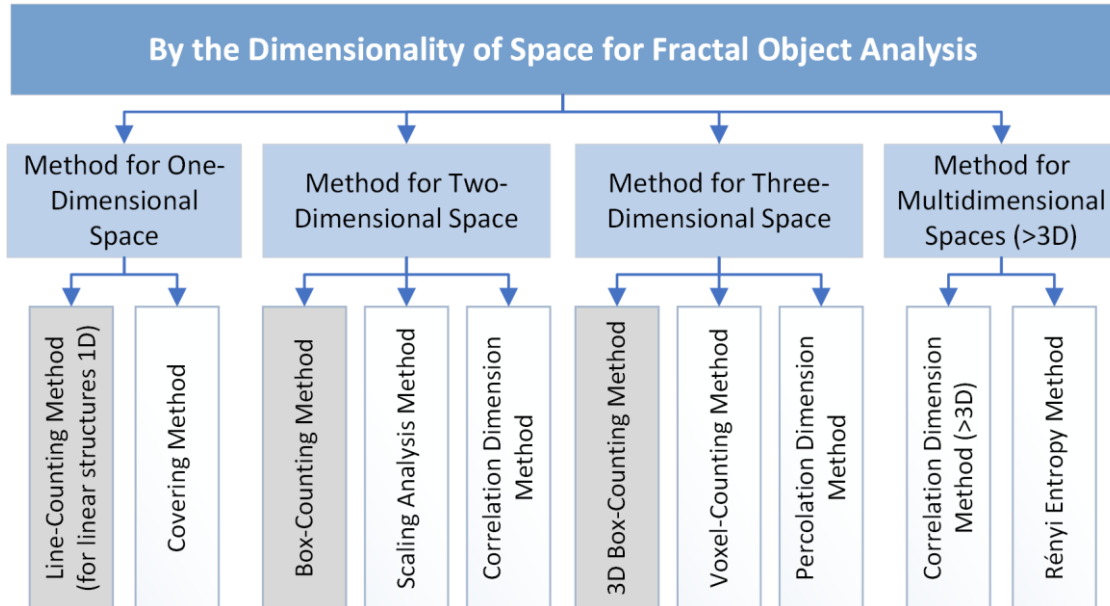


Fig. 2. Classification of fractal calculation methods by spatial dimensionality

Methods for Analyzing Objects in Two-Dimensional Space (Fig. 2):

- Box-Counting Method. Popular due to simplicity and capability of calculating dimensions for planar fractals of any shape. Effective for analyzing two-dimensional textures, cloud images, and topographic map characteristics.
- Scaling Analysis Method. Identifies self-similarity properties of fractal structures based on scaling changes in analyzed images. Applicable in geophysics, astronomy, and visualization of X-ray images.
- Correlation Dimension Method. Calculates fractal dimension through statistical analysis of distances between individual points. Widely used in ecology, engineering tasks, and particle clustering analysis.

Methods for Analyzing Objects in Three-Dimensional Space (Fig. 2) (Volumetric Fractals):

- 3D Box-Counting Method. A generalization of the grid method to three-dimensional spaces. Efficient for porous media, biological tissue structures, and cosmic object distributions.
- Voxel-Counting Method. Calculates fractal dimensions of objects in 3D models and tomographic data analysis. Beneficial for medical and materials science fields but requires specialized measurement equipment.
- Percolation Dimension Method: Differs from counting methods, focusing on analyzing geometric structures of connected clusters in porous media. Crucial for hydrodynamic research and underground reservoir analysis, yet requires specialized instrumentation.

Methods for Analyzing Objects in Multidimensional Space (Fig. 2) (>3D):

- Generalization Correlation Dimension Method. Rarely used method, applicable in chaos theory and dynamic systems analysis. Its effectiveness needs further study. Potentially useful in physical process research, economic analysis, and neuroscience, though difficult to generalize geometrically.
- Rényi Entropy Method. Utilized in statistics to determine data irregularity levels with complex parameterizations. Its effective application requires advanced computational resources and multidimensional optimization equipment.

The classification of methods based on the dimensionality of the space demonstrates how the effective choice of method significantly affects calculation complexity and computational time. Certain methods perform well only within defined-dimensional spaces and cannot be geometrically generalized. Nonetheless, this classification aids in the effective selection of methods tailored to specific practical tasks and experimental data availability.

A primary goal of classifying known fractal calculation methods is determining their **universality and standardization** for application in engineering research involving various technical objects and processes. For most practical tasks, the interrelation between calculated fractal characteristics and technological quality indicators is more critical than the accuracy of fractal dimension calculations. Thus, universality and standardization criteria are crucial, as specialized methods typically address only specific industry-related tasks.

Typological analysis of existing fractal calculation methods identified *universal and standardized methods* (Fig. 3), applicable across different spatial dimensions (1D, 2D, 3D, N-dimensional) and commonly accepted in various science and technology fields:

- Box-Counting Method. The most universal method applicable to 1D, 2D, 3D, and N-dimensional spaces. Commonly used in physics, biology, computer graphics, geophysics, and image processing. Limitations include difficulty analyzing internal geometric structures and potential errors from incorrect scale parameter selection.

- Correlation Dimension Method. Applied in dynamic systems, neuroscience, and economics. It relies on statistical correlations between fractal points and theoretically works in arbitrary-dimensional spaces but requires specialized algorithms and significant computational resources.

- Mass-Radius Method. Determines fractal dimension based on changes in point quantities depending on the radius of covering circles or spheres. Applicable in spaces of varying dimensionality but dependent on optimal sphere center selection and result averaging.

- Rényi Entropy Method. Evaluates the complexity of fractal structures in spaces of arbitrary dimensions. Requires powerful computing equipment and sophisticated multidimensional optimization algorithms.

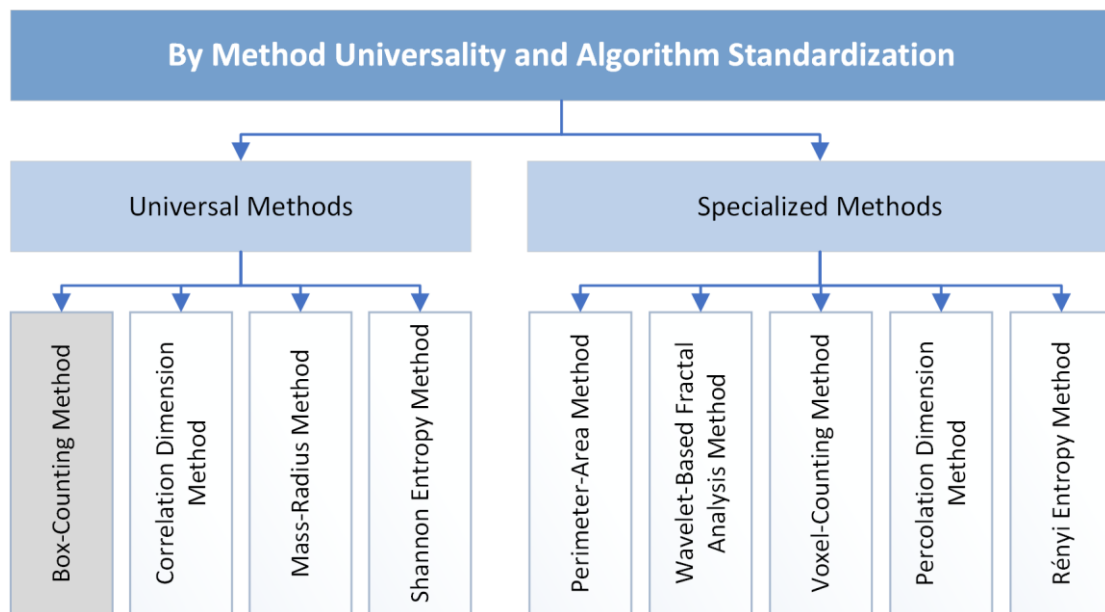


Fig. 3. Classification of fractal calculation methods by universality and algorithm standardization

Specialized methods limited by dimensionality and application fields (Fig. 3) are effective only in specific spaces (e.g., solely 2D or 3D) and used exclusively for solving specialized fractal analysis tasks:

- Perimeter-Area Method. Limited to 1D and 2D objects, unsuitable for multidimensional fractal analysis.

- Voxel-Counting Method. Narrowly specialized for 3D objects (medical, geophysical, tomography). Cannot be generalized without substantial modifications.

- Wavelet-Based Fractal Analysis Method. Mainly used for signals and images (1D, 2D) and not generalizable to higher-dimensional spaces, restricted primarily to porous cluster media analysis.

This type of classification makes it possible to clearly distinguish between general methods that produce the same results regardless of the dimensionality of the space in which the calculations are performed and to outline the range of areas of their effective use.

2. Analysis of Mathematical Foundations of Popular Computational Algorithms for Calculating Fractal Parameters of Multifractal and Quasi-fractal Objects

The conducted typological classification has identified several promising methods for addressing practical fractal analysis tasks related to automotive objects and processes. However, comparing the algorithmic complexity of the selected methods is necessary to choose the optimal approach in terms of universality and computational simplicity of fractal calculations.

Correlation Dimension Method involves utilizing a correlation function of the form:

$$C(\alpha) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j} \varphi(\alpha - |x_i - x_j|), \quad (1)$$

where φ is the Heaviside function, N is the total number of points in the set, and $|x_i - x_j|$ represents the Euclidean distance between points.

The correlation dimension calculates how the number of point pairs separated by a distance smaller than a scale parameter α changes. The more chaotic or ordered the points, the sharper the scale-dependent growth of this number of pairs. Fractal dimension is determined by:

$$D = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\ln C(\alpha)}{\ln \alpha}. \quad (2)$$

Despite its specific scope of practical applications, the Correlation Dimension Method has significant drawbacks: it is effective only with zero-dimensional sets (points), sensitive to sample sizes and various scaling noises, and requires extensive computations.

Perimeter-Area Method algorithmically computes the ratio of the perimeter to the area of specified objects at different scaling coefficients. Fractal dimension is defined as:

$$D \approx 2 \frac{\ln P}{\ln S}, \quad (3)$$

where P represents the perimeter, and S is the area of the object set.

Disadvantages include its limited applicability to two-dimensional linear transport-related objects. The method becomes complicated when working with curved contours such as urban transport route structures or determining transport flow optimization based on safety parameters. Additionally, it is highly sensitive to scaling noises.

Mass Dimension Method evaluates how the quantity of points (mass) within a circle, sphere of radius α , or cube with side α varies depending on α itself. For fractal structures, a power-law relationship holds:

$$M(\alpha) \propto \alpha^D. \quad (4)$$

Thus,

$$D = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\ln M(\alpha)}{\ln \alpha}, \quad (5)$$

where $M(\alpha)$ is the number of points within the sphere or cube of size α .

Advantages of this method include ease of implementation and applicability to objects without clearly defined boundaries (e.g., particle distribution in automotive powder coating or fuel spray efficiency analysis). However, it cannot be used effectively for analyzing objects with varying fractal scales.

Wavelet Transform Method employs wavelet transformation to decompose signals or images into components at various scales (frequencies). Fractal dimension is estimated by the energy decay of wavelet coefficients as scale changes:

$$E(\alpha) \propto \alpha^{-D}, \quad (6)$$

where $E(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_i |W_{\alpha,i}|^2$, $E(\alpha)$ is the average energy of wavelet coefficients at scale α , $W_{\alpha,i}$ represents wavelet coefficients, and N is the total number of points.

Main disadvantages include dependency on the chosen wavelet function (e.g., Daubechies, Haar, Morlet), limited scale resolution, sensitivity to scaling noise, poor handling of boundary effects, and high computational complexity.

Minimal Covering Method. This method represents a classical approach to determining the fractal dimension of objects. It is employed for analyzing chaotic point distributions, linear structures, and geometric figures in 2D and 3D spaces. The fundamental principle involves covering a fractal object with minimal-sized elements (such as squares, cubes, etc.). The total number of covering elements, $N(\alpha)$, is computed using a movable grid, followed by the calculation of its dependence on α . The fractal dimension is subsequently determined using a power-law relationship:

$$N(\alpha) \propto \alpha^{-D}, \quad (7)$$

$$D = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\ln N(\alpha)}{\ln(\frac{1}{\alpha})}. \quad (8)$$

Drawbacks include sensitivity to the chosen minimal coverage scale range, increased computational complexity, uneven grid coverage, and difficulties applying minimal grids above two dimensions, significantly complicating the algorithm.

Most algorithmic approaches mentioned primarily focus on calculating fractal geometric characteristics of self-similar two-dimensional objects. They are ineffective when analyzing multifractal and quasi-fractal structures, requiring segmentation of binary images and determination of topological and fractal dimensions of segments or entire models. Extending these methods to three-dimensional objects is challenging due to difficulties accurately identifying geometric parameters such as distances, perimeters, areas, and occupied versus unoccupied cells within chaotic fractal structures. Consequently, linking technical and technological properties of analyzed objects to fractal characteristics of constructed models in practical applications remains a complex problem.

Special attention should be given to the Box-counting Method, which is similar algorithmically to the Minimal Covering Method and particularly effective for a wide range of practical tasks. Its essence involves overlaying a uniform grid composed of cells of a certain size onto a model and counting the number of cells containing the fractal body of the object. This method is an optimal approach for determining the fractal dimension of objects in practical problems across various fields. It facilitates the analysis of geometric characteristics of point sets, linear structures, planar, and spatial figures in two- and three-dimensional spaces, and can be generalized to spaces of arbitrary dimensions.

The method's two primary disadvantages include, on one hand, the correct selection of the minimal necessary scale coverage when analyzing fractal characteristics of a specific object and, on the other hand, the challenges associated with overlaying and visualizing hyper-grids for counting cells occupied by fractals in multidimensional spaces.

As mentioned above, the main idea is to cover the fractal object with elements of a uniform grid of required size α . The scale coverage sizes can initially be minimal, aligned directly with the objectives of a specific practical task. After applying the uniform grid, the total coverage number of elements $N(\alpha)$ in the image is determined. The dependency $N(\alpha)$ on α is calculated using a power-law relationship:

$$N(\alpha) \propto \alpha^D, \quad (9)$$

and the fractal dimension is computed as:

$$D \approx \frac{\ln N(\alpha)}{\ln \alpha}. \quad (10)$$

Applying the Box-counting method involves discretely covering the studied object's image with a set of cells arranged in a grid with a particular scale factor. For effective identification and precise analysis of geometric characteristics of such fractal models, grid element sizes are optimally chosen relative to the object and may approach the pixel size for two-dimensional raster images.

Works [10-14] describe developed approaches and methods for effectively applying the Box-counting method as a universal tool for fractal analysis of technological and safety characteristics of objects across various contemporary production and technological fields.

For instance, study [10] proposes a method of quantitative fractal diagnostics of diesel engine fuel injectors (Fig. 4). Experimental studies of fuel spray quality using repaired injectors have established a direct relationship between the fractal dimension of spray patterns and wear levels of precision pairs in fuel equipment. The experimental results indicate that the fractal dimension of the spray pattern can effectively diagnose injector readiness for engine operation or identify the necessity for repairs or replacement.

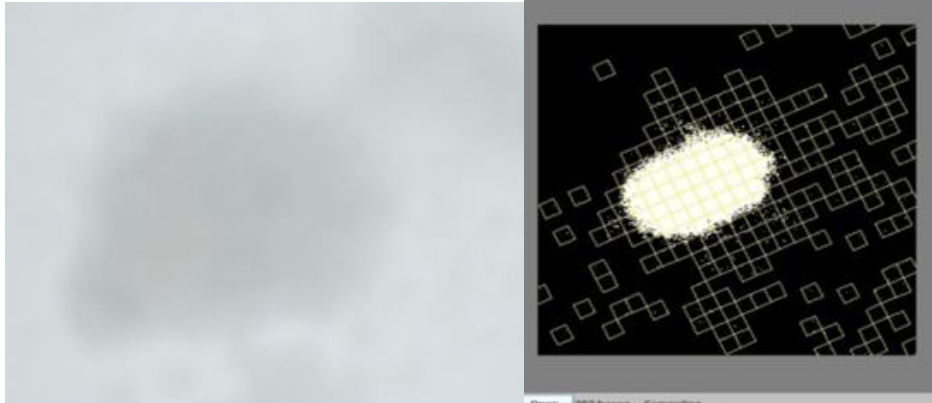


Fig. 4. Fractal assessment of fuel spray quality in internal combustion engine injectors

Research [11] presents a method of quantitative fractal assessment of powder coating quality, facilitating effective management of powder charging processes considering different particle dispersions and moisture levels. Computer implementation of quality evaluation and management processes for powder paint application was executed (Fig. 5). The studies suggest that significant optimization of tribostatic powder coating processes is possible in small enterprises within the mechanical engineering or automotive industries.

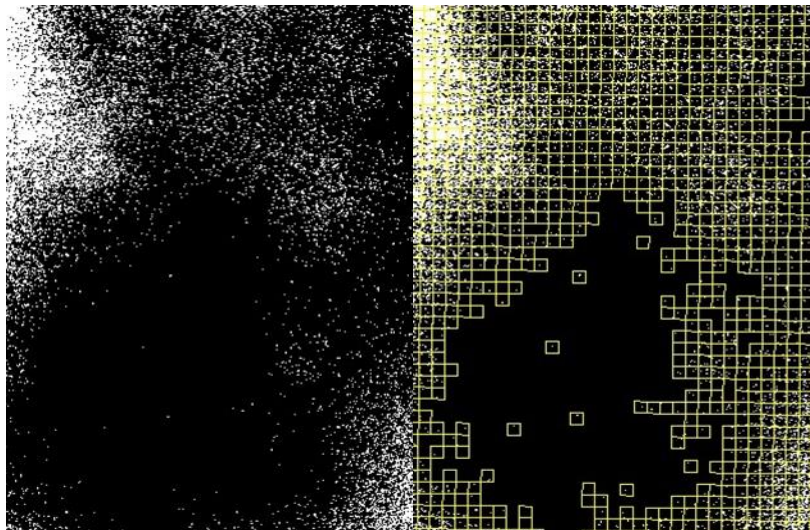


Fig. 5. Fractal analysis of tribostatic powder coating

Study [12] investigates the influence of geometric parameters, including fractal ones, of discrete urban transportation network models on passenger transportation quality and improvement pathways for the structural components of the transportation network. Methods for identifying route diagrams (Fig. 6-a) were developed, highlighting essential geometric (fractal) elements of the discrete urban transportation network model significantly impacting passenger transportation quality. Algorithms and methods for computer

calculations of fractal characteristics of identified images are presented, facilitating effective adjustments of the technical and technological properties of urban transport infrastructure.

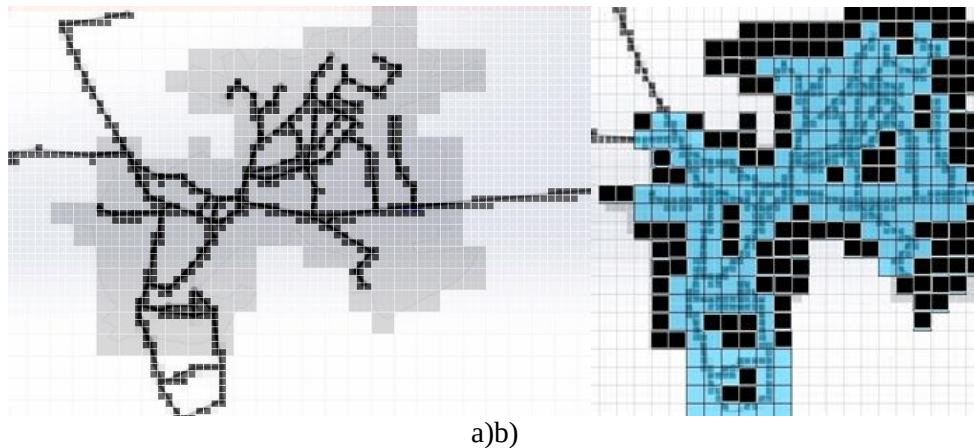


Fig. 6. Fractal analysis of transportation route network quality and route overlap indicators

Research [13] addresses urban passenger transportation features and the impact of fractal characteristics of transport systems on evaluating route overlap indicators (Fig. 6-b). A fractal method was proposed to assess route overlap in specific zones and optimize transport vehicle operation on routes during various daily periods. Research outcomes facilitated effective route modifications, timely adjustments to carriers' schedules, normative execution times for trips, driver labor organization systems, and combined operational modes for urban passenger transport.

However, applying the universal Box-counting method becomes problematic when analyzing fractal models in three-dimensional or especially multidimensional spaces due to the absence of computational tools for calculating geometric characteristics of specific internal regions and the model overall.

Study [14] developed an innovative method for stacking box-shaped cargo in automotive transport, significantly reducing cargo unit blocking costs by designing specialized loading schemes. The study employed fractal mathematics to assess the quality of blocking cargo with hazardous materials, considerably lowering securing costs and optimizing safety criteria for hazardous materials transportation. The primary issue was identifying internal geometric characteristics of the fractal model (Fig. 7), raising questions about linking fractality across individual layers and determining each layer's influence on technological and safety characteristics of the stacked cargo.

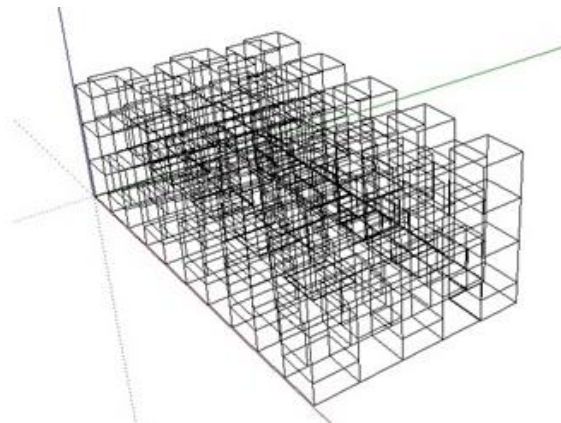


Fig. 7. Three-dimensional model for stacking box-shaped cargo on freight vehicles

Authors addressed this specific problem by developing a methodology for evaluating and comparing fractal parameters of separate object projections (Fig. 8). However, this approach may not be efficient or applicable for similar tasks involving the determination of fractal characteristics in multidimensional object models across other technical fields.

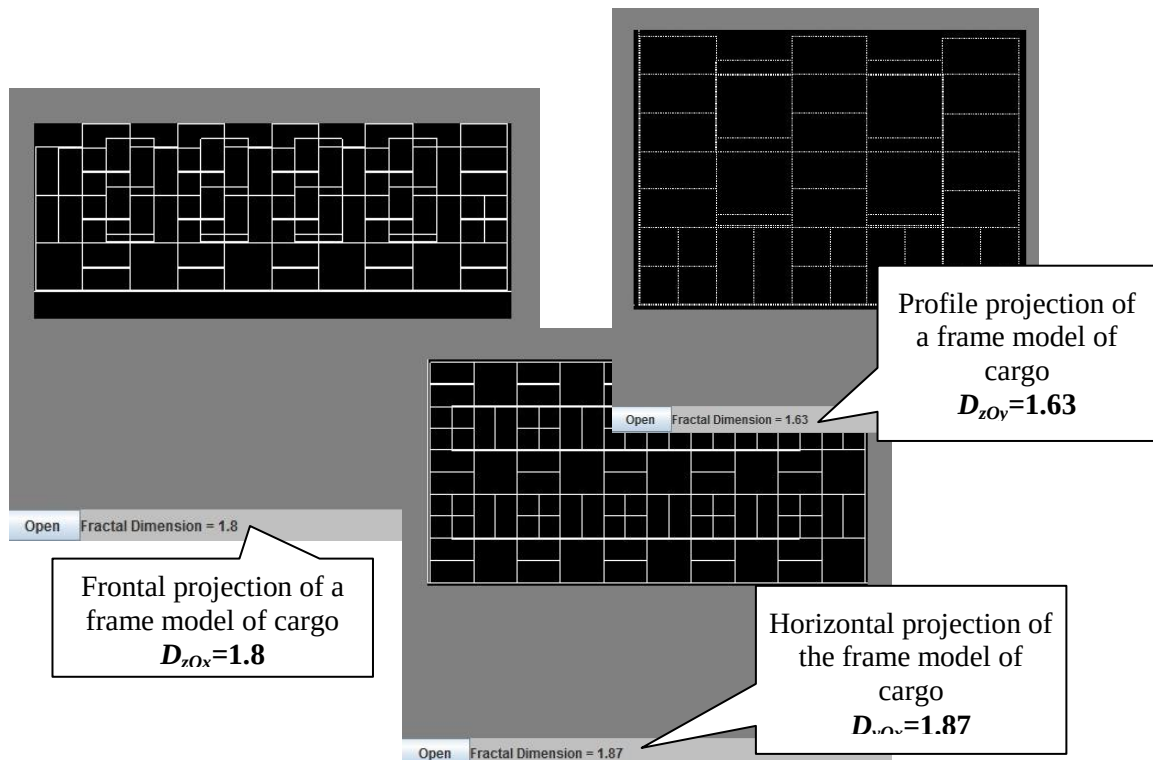


Fig. 8. Methodology for fractal quality assessment of cargo stacking based on separate projections

3. Relationship Between Fractal Parameters of Quasi-Fractal and Multifractal Computer Models and Technological, Technical, and Economic Characteristics of Automotive Industry Objects and Processes

The authors' experience in developing fractal analysis methods for various technical problems has allowed establishing relationships between fractal geometric characteristics and technological qualities of objects and processes in the automotive industry, urban transport networks, logistics operations, infrastructure optimization, transport flow efficiency, and road safety.

Fractal dimension indicators of urban and intercity roads determine their branching degree and spatial occupancy. Networks with low fractal dimensions ($D < 1.5$) are characterized by simple, linear structures with limited routes and low throughput. Networks with high fractal dimensions ($D > 1.7$) have more complex interconnections, a greater number of alternative routes, and enhanced transport accessibility. Thus, applying fractal dimension calculation methods in urban road modeling can assess how effectively the future network will adapt to the urban environment, identify bottlenecks, and predict congestion levels. Road network optimization based on fractal characteristics can reduce average travel time and vehicle energy consumption.

Correct calculation methods for fractal parameters of road surfaces allow determining their roughness, directly influencing tire-road adhesion and driving safety. Road surfaces with excessively low fractal dimensions ($D < 2.3$) result in poor tire-road adhesion, particularly on wet and snowy roads. Conversely, surfaces with excessively high fractal dimensions ($D > 2.6$) lead to rapid tire wear and increased vehicle energy consumption. Such fractal analysis facilitates determining the optimal road texture for maximum safety and minimal vehicle wear.

Urban traffic flows also exhibit fractal structures, formed through complex interactions between vehicles, traffic lights, and road infrastructure. A low fractal dimension of traffic flow ($D < 1.2$) indicates regular traffic, low transport density, and minimal congestion influence. Conversely, excessively high fractality ($D > 1.5$) reflects chaotic traffic conditions, significant variability in flow density, potentially causing accidents and congestion. Fractal analysis thus provides a numerical measure for predicting traffic intensity and adaptive traffic light adjustments to mitigate congestion.

Fractal analysis methods can effectively optimize urban development parameters and automotive transport network accessibility. Fractality serves as a qualitative measure of how efficiently urban structures organize roads, residential areas, and transport hubs. Compact cities with fractal dimensions around $D \approx 1.5$ offer improved transport accessibility and reduce average travel distances. In contrast, highly branched cities with high fractal dimensions ($D > 1.8$) feature complex transport structures and longer travel times. Such calculations allow for optimal forecasting of the impact urban planning changes have on transportation

efficiency.

Correctly calculated fractal parameters can be effectively utilized in logistics for managing urban goods distribution. Routes with low fractal dimensions ($D < 1.3$) display centralized patterns, vulnerable to congestion. Conversely, high fractality patterns ($D > 1.5$) offer adaptive structures, improving resilience to delays and disruptions. Fractal analysis identifies weak points in freight flows and facilitates more flexible logistics schemes.

Additionally, fractal indicators of warehouse systems influence logistical route efficiency, directly impacting goods distribution principles. Warehouses with low fractal dimensions ($D < 1.2$) have simple structures but limited adaptability to demand fluctuations. Warehouses with higher fractality ($D > 1.4$) provide better flexibility and faster cargo handling. Here, fractal analysis improves inventory management, minimizing delays and optimizing costs.

Many practical tasks in automotive transportation relate to optimizing safety characteristics. In this context, fractal calculation methods enable predicting hazardous road sections, improving road junction designs to reduce accident probabilities, developing adaptive traffic management systems through chaotic parameter calculations, and reducing network congestion by optimizing transport infrastructure.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

The research conducted within this work, particularly regarding the applicability of analyzed methods for calculating fractal dimensions, their classification according to defining characteristics, and analysis of their algorithmic foundations, leads to the conclusion that the Box-Counting Method is the most effective and versatile. This method clearly visualizes the geometric complexity of object models and their self-organization. Its algorithm is sufficiently simple, enabling quantitative assessment of hierarchical organization and structural chaos levels of analyzed objects. This directly influences the accurate determination of interrelations between fractal parameters and technological properties of real physical phenomena and processes.

If the proposed concept of universality for the Box-Counting Method is accepted, and further theoretical, methodological, and algorithmic components are expanded and deepened, the primary remaining challenge is the absence of a visualization principle for the internal structures of studied objects in spaces of dimensionality greater than two. Reducing the procedure for calculating the fractal dimension of objects, even in three-dimensional space, to analyzing characteristics of individual projections often fails to yield the desired results. Therefore, an innovative approach to calculating fractal parameters has been proposed, based on continuously reducing the dimensionality of the space in which the models are located.

Practically, this procedure resembles progressively layering a multidimensional object into separate layers of varying dimensionalities, determining the fractal parameters of each layer, and consolidating geometric data into a unified informational framework. This form of fractal scanning allows for adjustments to individual layers, elements, or nodes of the model, thereby facilitating further enhancement of its technological and technical characteristics.

Initial computational experiments have produced promising results, demonstrating broad potential for generalization of this methodology to spaces of arbitrary dimensionality.

CONCLUSIONS

1. All research objectives aimed at achieving the goal of this study have been fulfilled. A typological classification of fractal dimension calculation methods was conducted, positioning them as instrumental tools for addressing practical tasks across various scientific and technical fields. This classification outlined critical geometric criteria for the optimal selection of universal methods when solving design tasks within automotive and transportation technologies.

2. Computational algorithms for determining fractal parameters of objects were studied, particularly concerning their generalization potential and applicability to spaces of arbitrary dimensions. The strengths and limitations of these methods were identified, and ideas for developing an innovative fractal parameter calculation method based on the dimensionality reduction paradigm were proposed.

3. Key elements reflecting the interrelation and mutual influence between fractal parameters of quasi-fractal and multifractal computer models and technological, technical, and economic characteristics of automotive objects and processes were identified. The impact of each studied parameter on improving transport object design processes was analyzed.

REFERENCES

1. Feder, J. (1988). *Fractals*. Springer US. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>
2. Florio, B. J., Fawell, P. D., & Small, M. (2019). The use of the perimeter-area method to calculate the fractal dimension of aggregates. *Powder Technology*, 343, 551–559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.030>

3. Shiozawa, Y., Miller, B. N., & Rouet, J.-L. (2014). Fractal dimension computation from equal mass partitions. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 24(3), 033106. <https://doi.org/10.1063/1.4885778>
4. Bouda, M., Caplan, J. S., & Saiers, J. E. (2016). Box-Counting Dimension Revisited: Presenting an Efficient Method of Minimizing Quantization Error and an Assessment of the Self-Similarity of Structural Root Systems. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00149>
5. Krakovská, A. (2019). Correlation Dimension Detects Causal Links in Coupled Dynamical Systems. *Entropy*, 21(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/e21090818>
6. Lovejoy, S. (1982). Area-Perimeter Relation for Rain and Cloud Areas. *Science*, 216(4542), 185–187. <https://doi.org/10.1126/science.216.4542.185>
7. Liu, S., & Chen, Y. (2022). A Three-Dimensional Box-Counting Method to Study the Fractal Characteristics of Urban Areas in Shenyang, Northeast China. *Buildings*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/buildings12030299>
8. Yongjie, L., Wenqing, H., & Junning, Z. (2018). Construction of Three-Dimensional Road Surface and Application on Interaction between Vehicle and Road. *Shock and Vibration*, 2018(1), 2535409. <https://doi.org/10.1155/2018/2535409>
9. Szustalewicz, A. (2007). Minimal Coverage of Investigated Object when Seeking for its Fractal Dimension. In J. Pejaś & K. Saeed (Eds.), *Advances in Information Processing and Protection* (pp. 117–128). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73137-7_10
10. Pustiulha, S., Samostian, V., Tolstushko, N., Korobka, S., & Babych, M. (2017). Fractal diagnostics of the degree of fuel atomization by diesel engine injectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(8–90), 40–46. Scopus. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116104>
11. Pustiulha, S., Holovachuk, I., Samchuk, V., Samostian, V., & Prydiuk, V. (2020). Improvement of the technology of tribostate application of powder paints using fractal analysis of spray quality. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 280–289. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_28
12. Pustiulha S.I., Prydiuk V.M., Holovachuk I.P. “Metod fraktalnoi otsinky pokaznyka nakladannia marshrutnykh skhem dlia optymizatsii miskykh pasazhyrskykh perevezen”. *Naukovyi zhurnal “Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti”* – Lutsk: Lutskyi NTU, 2020. – Vyp. 1(14). – S. 124–135. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i14.355>
13. Pustiulha, S., Samchuk, V., Samostian, V., Prydiuk, V., & Dembitskij, V. (2023). Influence of the City Transport Route Network Discrete Model Geometrical Parameters on a Quality of a Passenger Traffic System Operation. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 536 LNNS, 740–751. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_66
14. Pustiulha, S., Samchuk, V., Prydiuk, V., Pasichnyk, O., & Shymchuk, O. (2024). Improving Safety Criteria for Transporting Hazardous Goods by Road Through Optimizing the Geometric Parameters of their Stowage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3(129)), 74–84. Scopus. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307235>

Пустюльга С.І., Самчук В.П., Головачук І.П., Приступа О.В., Лелик Я.Р. Аналіз методів розрахунку фрактальної розмірності як інструменту удосконалення експлуатаційних та безпекових характеристик об’єктів автомобільного транспорту

Робота присвячена розробці концепції ефективного використання методів аналізу та розрахунку фрактальної розмірності моделей у дво-, тривимірному та багатовимірних просторах для вирішення практичних завдань удосконалення якісних характеристик об’єктів автомобільного транспорту, транспортної інфраструктури та логістики. Визначено найбільш універсальний та обчислювально ефективний метод розрахунку фрактальних параметрів, який відкриває нові можливості для оптимізації процесів моделювання реальних систем і суттєво підвищує якість їх аналізу та прогнозування.

Сучасні прикладні задачі, у тому числі і в галузі транспортних технологій, активно рухаються в бік дослідження процесів у багатовимірних просторах, які пов’язані із вивченням динаміки поведінки хаотичних систем. Пошук універсальних методів і алгоритмів розрахунку фрактальних параметрів моделей багатопараметричних об’єктів у просторах довільної розмірності, які змінюють свої властивості, наприклад в часі, вимагає додаткових досліджень для їх узагальнення.

Аналіз літературних джерел показав, що отримані у них результати включають ряд невирішених задач фрактального аналізу. Вони стали основою для формулювання завдань роботи, серед яких: класифікація методів розрахунку фрактальної розмірності, як інструменту розв’язання практичних задач у різних галузях науки та техніки; дослідження обчислювальних алгоритмів підрахунку фрактальних параметрів об’єктів, з точки зору можливості їх узагальнення та використання, для просторів довільного числа вимірів; визначення взаємовпливу та взаємозв’язку фрактальних параметрів квазіфрактальних і мультифрактальних комп’ютерних моделей із технологічними, технічними та економічними

характеристиками об'єктів та процесів автомобільної галузі. На цій основі окреслено шляхи розробки ефективного, в сенсі практичних розрахунків та аналізу фрактальних об'єктів, методу, основними характеристиками якого є універсальність та стандартизованість.

Виконані у роботі дослідження щодо можливостей використання проаналізованих методів розрахунку фрактальної розмірності, їх класифікація за визначальними ознаками, аналіз їх алгоритмічної основи, дозволили зробити висновок, що найбільш ефективним і універсальним є - Box-Counting Method. Він відкриває можливості для максимально зрозумілої візуалізації геометричної складності моделей та їх самоорганізацію. Алгоритм методу достатньо простий і дозволяє кількісно оцінити рівень ієрархічної впорядкованості та хаотичності структури досліджуваних об'єктів, який прямо впливає на коректне визначення взаємозв'язків між параметрами фрактальності та технологічними властивостями реальних фізичних явищ та процесів.

Запропоновано концепцію щодо удосконалення найбільш універсального методу коробок, окреслено шляхи розширення та поглиблення його теоретичної, методологічної, алгоритмічної складових. Висунуто ідею розрахунку фрактальних параметрів моделей об'єктів у просторах довільного числа вимірів шляхом неперервного пониження розмірності простору, в якому вони знаходяться. Така процедура схожа, в практичному сенсі, із поступовим розшаруванням багатовимірної моделі на окремі шари з різною розмірністю, визначення параметрів фрактальності таких шарів і зведення геометричних даних у єдину інформаційну основу. Таке своєрідне фрактальне сканування дозволить коригувати окремі шари, елементи чи вузли моделі для подальшого удосконалення її технологічних та технічних властивостей.

Ключові слова: фрактальна розмірність, технологічні та експлуатаційні характеристики об'єктів транспорту, багатовимірний простір, концепція взаємозв'язку геометричних параметрів та якісних властивостей об'єктів транспортної інфраструктури.

ПУСТЮЛЬГА Сергій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри архітектури та дизайну Луцького національного технічного університету, e-mail: mbf.declutsk@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7623-7803>

САМЧУК Володимир Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету, e-mail: volodsam@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>

ГОЛОВАЧУК Ігор Павлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектури та дизайну Луцького національного технічного університету, e-mail: golovachuk.igor@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0811-6107>

ПРИСТУПА Ольга Василівна, старший викладач кафедри архітектури та дизайну Луцького національного технічного університету, e-mail: prystupa.olga@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8751-2740>

ЛЕЛИК Ярослав Романович, кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектури та дизайну Луцького національного технічного університету, e-mail: iaroslavlelyk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2678-896X>

Serhii PUSTIULHA, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Design, Lutsk National Technical University, e-mail: mbf.declutsk@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7623-7803>

Volodymyr SAMCHUK, Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Construction and Civil Engineering, Lutsk National Technical University, e-mail: volodsam@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>

Ihor HOLOVACHUK, Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Architecture and Design, Lutsk National Technical University, e-mail: golovachuk.igor@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0811-6107>

Olga PRYSTUPA, Senior Lecturer of the Department of Architecture and Design, Lutsk National Technical University, e-mail: prystupa.olga@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8751-2740>

Jaroslav LELYK, Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Architecture and Design, Lutsk National Technical University, e-mail: iaroslavlelyk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2678-896X>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1710

УДК 626.8:662.6
UDK 626.8:662.6

Sereda B.¹, Mukovska D.², Zyuzin E.³, Orel V.⁴

¹*Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine*

²*O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine*

³*Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine*

⁴*Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine*

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF TRANSPORT SYSTEM DEVELOPMENT: FROM CONCEPT TO IMPLEMENTATION

The article examines the environmental aspects of developing modern transport systems, focusing on sustainable development and the integration of eco-friendly technologies. Transportation is a major contributor to environmental pollution, making the reduction of emissions, improvement of energy efficiency, and minimization of climate impact critical tasks. The study aims to analyze the main approaches to creating environmentally efficient transport systems and identify the key factors influencing their implementation.

The article provides a detailed overview of international initiatives aimed at utilizing green technologies in transportation, including the development of electric transport, the use of renewable energy sources, the creation of intelligent transport networks, and the promotion of cycling and pedestrian mobility. Successful project examples from Germany, the Netherlands, China, Sweden, and Ukraine are presented, offering potential models for other countries.

Additionally, the article analyzes the economic, social, and institutional challenges encountered in the process of implementing sustainable transport, including the lack of appropriate legislative initiatives, high costs for new technologies, and insufficient environmental awareness among the population. Special attention is given to the importance of cross-sectoral cooperation in achieving global decarbonization goals for transport. The article concludes with a forecast of the future development of eco-friendly transport and suggestions for future research and practical initiatives in this field.

Keywords: transport systems, sustainable development, green technologies, electric transport, renewable energy sources, intelligent transport systems (ITS)

INTRODUCTION

In the modern world, the transport system is a critical component of infrastructure that ensures mobility, supports economic activity, and creates conditions for sustainable regional development. At the same time, transportation is one of the primary sources of anthropogenic environmental pressure. According to the International Energy Agency (IEA), the transport sector is responsible for approximately 23% of global carbon dioxide emissions related to energy use. The growth of automobile use, intensive fossil fuel consumption, and the spatial expansion of urbanized areas lead to increased noise levels, air pollution, landscape fragmentation, and the reduction of green spaces.

In response to the challenges posed by climate change and environmental degradation, there has been a shift in the development concepts of transport systems in recent decades. Emphasis is placed not only on the functionality and efficiency of transportation but also on the need to minimize ecological impacts, implement sustainability principles, and integrate with the natural environment. In this context, there is a growing need to analyze and implement ecological approaches to planning, designing, and operating transport infrastructure.

LITERATURE REVIEW AND PROBLEM STATEMENT

The concept of greening the transport system emerges at the intersection of ecology, urban planning, transport logistics, and systems management. The primary goal of this approach is to harmonize the interaction between transport infrastructure and the natural environment by minimizing the negative impacts of its operation. In academic discourse, an ecological transport system is viewed as a set of technical, organizational, and social solutions aimed at reducing pollutant emissions, conserving natural resources, decreasing noise pollution, and ensuring rational land use.

One of the key concepts underlying greening is sustainable transport, which, according to the European Conference of Ministers of Transport (ECMT), ensures the accessibility of mobility without harming the environment, public health, or the needs of future generations. This approach involves a paradigm shift—from automobile-centric solutions to supporting eco-friendly and energy-efficient transport modes such as public transport, cycling, and walking.

Another important concept is the eco-design of transport infrastructure, which includes principles of environmental planning: preserving natural landscapes, integrating green spaces into transport corridors, creating noise barriers, and using environmentally safe construction materials. Designing eco-friendly

transport systems requires an integrated approach that involves interaction between transport policy and policies in the areas of environmental protection, energy, land use, and health.

An essential tool in this context is Environmental Impact Assessment (EIA), which identifies potential risks associated with the construction or reconstruction of transport infrastructure and helps develop compensatory or preventive measures. In many countries (especially within the EU), the EIA procedure is a mandatory stage in implementing transport projects.

Moreover, the ecological approach requires considering the life cycle of transport vehicles—from production and operation to disposal. The life-cycle thinking concept is used to calculate the full environmental footprint of transportation, enabling a more informed choice between alternative technologies (e.g., electric vehicles, hydrogen transport, or biofuels).

Thus, the theoretical foundations of greening the transport system are based on a systematic, interdisciplinary approach that combines environmental requirements with functionality, efficiency, and social acceptability.

PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

The aim of this research is to analyze the environmental aspects of building modern transport systems, with a focus on sustainable development, the implementation of innovative technologies, and reducing the negative impact of transportation on the environment. Specifically, the study aims to identify effective approaches for reducing emissions, improving energy efficiency, and integrating eco-friendly solutions into transport systems.

The research objectives are as follows: to assess the current state of environmental aspects in transport systems across different countries; to examine key technologies and innovations aimed at reducing emissions and enhancing energy efficiency in transport; to analyze international experience and successful examples of implementing eco-friendly technologies in transportation; to identify economic and technical barriers hindering the widespread adoption of environmentally clean transport solutions; to evaluate the role of government bodies and international organizations in the development of sustainable transport systems; to explore the social factors influencing the adoption of green transport solutions, and to consider ways to increase environmental awareness among the public; and to outline the prospects for the development of eco-friendly transport systems and their integration into the global context of sustainable development.

RESEARCH RESULTS

In the process of greening the transport system, the implementation of innovative technologies and practical tools plays a crucial role in ensuring the reduction of emissions, improving energy efficiency, and minimizing the overall environmental footprint of transport. Among these, key technologies include alternative energy sources, intelligent transport systems, environmental monitoring, and digital platforms for optimizing transportation.

Alternative Energy Sources

One of the main directions is the transition to environmentally friendly fuels. The most widespread today are: electric transport, which generates no local emissions and has a high efficiency coefficient, hydrogen technologies, providing long-range autonomous operation with no CO₂ emissions, next-generation biofuels, renewable resources with a smaller carbon footprint compared to traditional fuels, these energy sources not only reduce the environmental burden but also promote energy decentralization, which is essential for ecologically vulnerable regions.

To clearly demonstrate the advantages of transitioning to electric transportation, let us examine the change in CO₂ emissions per kilometer traveled. Figure 1 presents a comparison of emissions from internal combustion engine (ICE) vehicles and electric vehicles.

As shown in the graph, the average emissions from ICE vehicles are approximately 180 g/km, whereas electric vehicles, considering the average emissions from electricity generation, produce only around 40 g/km. This indicates a reduction in emissions by nearly a factor of 4.5 when switching to electric propulsion.

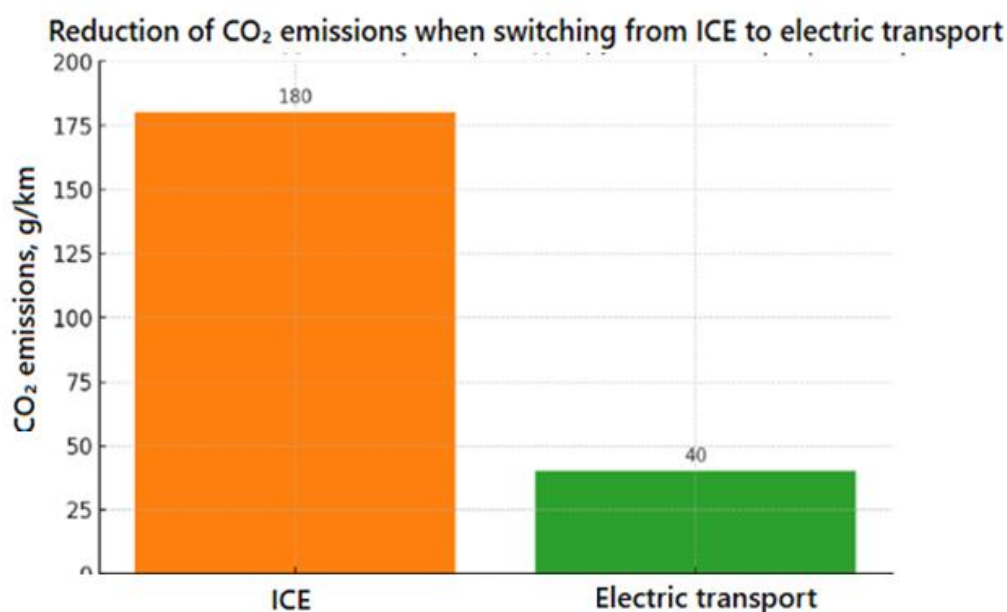


Figure 1 — Reduction of CO₂ emissions when transitioning from internal combustion engines (ICE) to electric transportation.

Such a reduction is of critical importance for large cities, where the density of traffic flows is high, and the issue of air pollution becomes particularly acute. The adoption of electric transportation not only reduces greenhouse gas emissions but also enhances the quality of life for residents, lowers healthcare costs, and aids in ecological restoration.

These energy sources not only alleviate pressure on the atmosphere but also promote the decentralization of energy systems, which is crucial for ecologically vulnerable regions.

Intelligent Transport Systems (ITS)

Intelligent transport systems optimize traffic flows, reduce congestion, save fuel, and improve the environmental situation in cities. The key components of ITS are: adaptive traffic control systems, digital platforms for monitoring road and air quality, GPS and big data technologies for predicting traffic load and optimizing transport routing, information systems are also actively used in logistics to create routes with minimal CO₂ emissions—so-called green routes.

Environmental Monitoring Systems

Effective transport system management is impossible without the systematic collection and analysis of environmental data. Environmental monitoring tools include: stationary air quality monitoring stations, mobile sensor platforms on vehicles, drones for collecting environmental information from hard-to-reach areas, decisions on adjusting traffic patterns and restricting vehicle access to high-pollution zones (e.g., Low Emission Zones in Europe) are based on this data.

Urban Solutions

Modern environmental transport policy focuses on integrating transport with the urban environment. These solutions include: infrastructure development for cycling and walking, multimodal transport development, use of environmentally safe materials in the construction of roads, stations, and bus stops.

Along with technical solutions, citizens' transport behavior is also changing under the influence of new environmental norms and digital services that simplify the choice of eco-friendly mobility options.

DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

Real-World Examples of Environmentally-Oriented Transport Solutions

At the global level, an increasing number of countries are incorporating environmentally sustainable approaches into their transport policies. These practices illustrate that sustainable transport development can successfully integrate functionality, energy efficiency, and environmental stewardship. The following section highlights emblematic examples of "green" transport initiatives that have set a benchmark for eco-conscious mobility.

Germany: Green Transport Transformation

Germany is at the forefront of implementing strategies aimed at decarbonizing its transport sector. The Klimaschutzprogramm 2030 outlines ambitious measures focused on sustainable mobility, including: large-scale promotion of electric vehicles (targeting 15 million EVs by 2030); expansion of cycling infrastructure,

notably through high-speed bicycle highways (e.g., Radschnellweg); significant investment in the electrification and modernization of railway networks.

In addition, several cities—such as Darmstadt—have piloted initiatives offering free public transport during peak hours, aimed at reducing reliance on private vehicles.

The Netherlands: Europe's Cycling Capital

Amsterdam and Utrecht serve as prime examples of successful integration of cycling into urban mobility systems. Key components of their approach include: over 500 km of dedicated cycling lanes; automated bicycle parking facilities; traffic signal prioritization for cyclists; active public engagement in transport planning.

Such measures have substantially alleviated road congestion and improved urban air quality.

China: Electrification of Urban Buses

China has demonstrated a large-scale shift toward electric public transport, particularly in Shenzhen, which became the first metropolis to transition its entire fleet of over 16,000 buses to electric power. This achievement is supported by: ongoing expansion of charging infrastructure; substantial investment in the development of advanced battery technologies.

This case exemplifies the feasibility of a full-scale transition to electric mobility within the public sector.

Sweden: The "15-Minute City" Concept

Stockholm is actively implementing the "15-minute city" model, an urban planning concept that ensures residents can access essential services within 15 minutes on foot or by bicycle. This model: reduces dependence on private vehicles; promotes decarbonization of the urban environment; enhances overall quality of life by fostering environmental and social balance.

Ukraine: Initial Steps Towards Sustainable Transport

Although Ukraine is only beginning to establish a systematic framework for green transport, several promising initiatives are already underway: introduction of electric buses in Kyiv, Lviv, and Dnipro; development of mobile applications for public transport planning; construction of cycling infrastructure in cities such as Poltava and Ivano-Frankivsk; implementation of smart traffic light systems.

These examples highlight the potential for adapting European best practices within the national context and advancing the ecological modernization of Ukraine's transport system.

RESEARCH RESULTS

Challenges and Opportunities in the Ecological Transformation of Transport Systems

Despite the numerous advantages of transitioning toward environmentally sustainable transport systems, this transformation entails a range of significant challenges. However, these challenges also open avenues for innovation, cross-sectoral collaboration, and a strategic rethinking of mobility approaches.

Institutional and Regulatory Barriers

In many countries, including Ukraine, the absence of a unified strategy or clearly defined regulatory frameworks for green mobility hinders the transition toward sustainable transport. Specific issues include: a lack of legislative incentives for manufacturers and users of electric vehicles; fragmentation in the implementation of emission standards; limited authority and resources at the local government level to implement innovative transport solutions.

Economic Challenges

The shift to environmentally friendly transport requires substantial financial investment in: infrastructure modernization; construction of charging stations; procurement of eco-efficient vehicles. High initial costs frequently act as a barrier to implementation, particularly under conditions of constrained public budgets or economic instability.

Technological Complexity and Uneven Access to Innovation

Access to advanced transport technologies remains unequal across regions. For instance: rural areas often face logistical difficulties in establishing charging infrastructure; larger urban centers benefit from greater levels of digitalization, enabling the use of Intelligent Transport Systems (ITS); transport models that succeed in one national context may not be directly transferable to others with differing socioeconomic realities.

Public Perception and Behavioral Factors

Even the most advanced technological solutions may lose their effectiveness if human behavior is not adequately addressed. Key issues include: persistent dependence on private vehicles; public distrust of new transport modes (e.g., e-scooters or electric buses); low levels of environmental awareness among the population.

Hence, it is essential to carry out public awareness campaigns, implement educational initiatives, and actively engage communities in shaping transport policies.

Future Prospects

Despite the existing challenges, the development of environmentally sustainable transport systems offers considerable long-term prospects: expansion of national and international funding mechanisms, such as the European Green Deal, Horizon Europe, the World Bank, and the European Bank for Reconstruction and Development, which collectively provide financial impetus for green mobility initiatives, rapid technological advancements, including the decreasing cost of battery technologies, the emergence of alternative eco-friendly fuels, and the evolution of smart infrastructure capable of supporting intelligent transport systems, a global shift towards decarbonization, reinforced by the commitments made under the Paris Climate Agreement, which continues to shape transport policies and investment strategies worldwide, changing generational values and cultural mobility patterns, particularly evident in large metropolitan areas, where younger populations increasingly favour walking, shared transport modes, and micromobility solutions over conventional car ownership.

In this context, it is essential not merely to respond to current challenges, but to actively shape a new mobility culture—one that is attuned to both environmental imperatives and the evolving social expectations of future generations.

CONCLUSIONS

The integration of environmental considerations into the design and development of transport systems is a vital component of sustainable development policy. Efforts aimed at reducing harmful emissions, enhancing energy efficiency, and improving the quality of urban life through innovative technological solutions have already demonstrated significant progress in many regions of the world.

However, the ecological transformation of transport infrastructure remains a complex and multidimensional challenge. Financial constraints, technological disparities, regulatory gaps, and socio-behavioral barriers continue to hinder the rapid transition to sustainable mobility. Overcoming these obstacles requires not only targeted investments but also systemic reforms and long-term strategic planning.

A key factor in achieving success is the effective collaboration between public authorities, private sector actors, and local communities. Their coordinated efforts can ensure the implementation of environmentally sound solutions that are economically viable and socially inclusive.

Among the most promising directions for future development are: the widespread adoption of electric transport, contributing to substantial reductions in greenhouse gas emissions; the deployment of intelligent transport systems (ITS) to optimize traffic flows and minimize environmental impact; the expansion of pedestrian and cycling infrastructure, promoting low-impact modes of transportation.

Additionally, further innovation in clean energy technologies and increased international cooperation on regulatory harmonization will facilitate the global diffusion of sustainable transport practices.

Ultimately, the ecological modernization of transport systems is not only an environmental imperative but also a driver of broader societal transformation. By reshaping mobility patterns and fostering environmental awareness, such changes contribute to building more resilient, livable, and future-oriented cities.

REFERENCES

1. IEA (2023). CO₂ Emissions from Fuel Combustion. International Energy Agency. <https://www.iea.org>
2. Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>
3. European Environment Agency (2022). Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport – the role of vehicles, fuels and transport demand. <https://www.eea.europa.eu>
4. Litman, T. (2021). *Well Measured: Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning*. Victoria Transport Policy Institute.
5. European Commission (2020). A European Strategy for Low-Emission Mobility. <https://ec.europa.eu>
6. Litman, T. (2022). *Smart Transportation Strategies for Sustainable Cities*. Victoria Transport Policy Institute.
7. Givoni, M., & Banister, D. (2013). *Moving Towards Low Carbon Mobility*. Edward Elgar Publishing.
8. UNECE (2021). *Intelligent Transport Systems and their impact on emissions*. <https://unece.org>

9. Hasan, S., & Ukkusuri, S.V. (2014). Urban activity pattern modeling using big data from mobile phone. *Transportation Research Part C*, 44, 212–226.
10. German Federal Government (2020). *Climate Action Programme 2030*.
11. Pucher, J., & Buehler, R. (2017). Cycling towards a more sustainable transport future. *Transport Reviews*, 37(6), 689–694.
12. Bloomberg NEF (2022). *Electric Buses in Cities: Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2*.
13. OECD (2021). *The 15-Minute City: Putting People at the Centre of Urban Mobility*.
14. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine (2023). *Sustainable Urban Mobility Plans: Pilot Cities in Ukraine*.

Середа Б.П., Муковська Д.Я., Зюзін Є.П., Орел В.Г. Екологічні аспекти побудови транспортної системи: від ідеї до реалізації

У статті розглядаються екологічні аспекти побудови сучасних транспортних систем з аспектом на сталий розвиток та інтеграцію екологічно чистих технологій. Транспорт є однією з основних причин забруднення навколишнього середовища, тому важливими завданнями є скорочення викидів, підвищення енергоефективності та мінімізація впливу на клімат. Метою дослідження є аналіз основних підходів до створення екологічно ефективних транспортних систем та визначення ключових чинників, що впливають на їх впровадження.

У статті детально розглядаються міжнародні ініціативи, спрямовані на використання зелених технологій у транспорті, зокрема розвиток електричного транспорту, застосування відновлюваних джерел енергії, створення інтелектуальних транспортних мереж та підтримка велосипедної та пішохідної мобільності. Наведено приклади успішних проєктів у Німеччині, Нідерландах, Китаї, Швеції та Україні, що можуть слугувати моделями для інших країн.

Також аналізуються економічні, соціальні та інституційні проблеми, які виникають у процесі впровадження сталого транспорту, включаючи відсутність відповідних законодавчих ініціатив, високі витрати на нові технології та недостатню екологічну свідомість населення. Особлива увага приділяється важливості міжсекторальної співпраці для досягнення глобальних цілей у сфері декарбонізації транспорту. Стаття завершується прогнозом подальшого розвитку екологічного транспорту та пропозиціями щодо майбутніх досліджень і практичних ініціатив у цій сфері.

Ключові слова: транспортні системи, сталий розвиток, зелені технології, електричний транспорт, відновлювані джерела енергії, розумні транспортні системи (ITS)

СЕРЕДА Борис Петрович - доктор технічних наук, завідувач кафедри автомобілів та транспортно-логістичних систем, Дніпровський державний технічний університет, E-mail: seredabp@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9518-381X>

МУКОВСЬКА Дар'я Яківна – аспірант Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: dariamykovska@gmail.com

ЗЮЗИН Євгеній Павлович – аспірант Дніпровського державного технічного університету

ОРЕЛ Віталій Геннадійович - аспірант Дніпровського державного технічного університету

Borys SEREDA, doctor of technical science, head of Department of Automobiles and Transport and Logistics Systems, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, city, E-mail: seredabp@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9518-381X>

Daria MUKOVSKA, postgraduate student of O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

Yevhenii ZIUZIN – postgraduate student of Dnipro State Technical University, Kamianske, Ukraine

Vitalii OREL – postgraduate student of Dnipro State Technical University, Kamianske, Ukraine

DOI 10.36910/automash.v1i24.1711

Sharko O., Doroshenko O.
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

INCREASING THE EFFICIENCY OF TRANSPORT BY OPTIMISING THE MANAGEMENT STRUCTURE OF COMPLEX LOGISTICS SCHEMES

A mathematical toolkit for modeling transportation processes under dynamic changes and conditions of uncertainty in the external environment has been developed. The informational analysis and synthesis of processes occurring in complex transportation and logistics systems, characterized by multifunctionality and a variety of structural relationship options, are presented. A classification of the main directions for integrating new information technologies into the management structure of complex transportation logistics systems has been proposed. The purpose and description of the structural components of the classification scheme provide a deeper understanding of their role in the overall system of integrated transportation logistics management. The modeling of management efficiency for transportation and logistics schemes has been performed, focusing on the distribution of cargo flows, volumes, routes, directions, and timing, depending on the dynamics of external stimuli and internal resource constraints, taking their uncertainty into account using sequential analysis and Markov chains. Mathematical models for optimizing transportation processes within complex logical schemes are considered. The ways and prospects for increasing the efficiency of multimodal transportation logistics schemes are outlined. Practical recommendations for applying specific mathematical models to complex transportation logistics systems are provided. It is shown that solving optimization problems for the management structure of complex logistics systems is most effectively achieved using structural and functional modeling based on quantitative and qualitative results with the help of computer models and algorithms. The optimization of the management structure of complex logistics systems aims to identify the most rational use of available resources to achieve predefined goals. This is its fundamental difference from traditional models and optimization problems under uncertainty and a lack of input information, where the enumeration of options is infinite. In contrast, the number of possible management options is strictly finite in the optimization of complex logistics management structures.

Keywords: optimization, modeling, transportation, logistics, management.

RELEVANCE OF THE TOPIC

Transport logistics is a supply chain and a strategic business guideline that allows you to adapt cargo delivery schedules to eliminate peak periods, respond to road conditions, etc. By actively identifying recurring problems, you can solve deep-seated issues and improve the quality of transportation [1]. The logistics management framework is a computer software system used to coordinate and organise logistics operations related to cargo tracking, inventory management, transportation and order processing [2]. Logistics management systems can increase the efficiency of transport companies, reducing logistics costs and increasing customer satisfaction [3, 4].

With a competent approach, transport logistics can be turned into a strategic initiative, the advantages of which are crucial for increasing profits and service transport logistics services. Services for the movement of goods play a large role not only within one state but also in international trade, especially in the conditions of division of labour and the growth of international economic relations. According to forecasts, approximately one-third of all world production produced over the next few years will be part of the international trade cycle.

Increasing freight volumes requires coordination in infrastructure facilities, ports, shipowners, railways, road and air transport. The effectiveness of freight management in transport logistics is determined by understanding the patterns of operation and optimising real processes, taking into account uncertainty [5]. The goal of the logistics approach is end-to-end management of material flows.

Transportation optimisation is the selection of the best alternative from a set of possible options in terms of the accepted optimality criterion and certain restrictions. Route optimisation is carried out with the mandatory inclusion of current routes, bottlenecks, detours, transport windows and traffic jams. Optimisation of packaging and loading processes is carried out by taking into account weight distribution, product type, and delivery sequence. Optimisation of the management structure of complex logistics schemes sets as its ultimate goal the organisation of cargo transportation and tracking of cargo along the route, which allows for more accurate planning and coordination of deliveries. In general, optimisation of transport logistics contributes to reducing financial costs, saving time, and improving the quality of service.

Modern logistics systems operate on transport and technological complexes consisting of vehicles, unloading and loading points, cargo movement routes. Optimization of such costs is determined by the characteristics of different types of transport [6].

For short-distance transportation, road transport is used, one of the advantages of which is high maneuverability and the ability to deliver cargo in small batches. Road logistics transportation is characterized by high speed, low investment, high flexibility, ease of adaptation to local conditions and does not require large infrastructure [7, 8]. Optimization of spatial layout nodes of the logical supply chain in the automotive industrial park is presented in [9]. The environmental component of automotive logistics is presented in [10]. The Vietnamese company Vietnam Presion Industry Company for the production of auto parts in [11] carried out work on minimizing transport costs by optimizing minimum distances for moving materials. The issue of optimizing the management structure of complex logistics schemes in road transportation is given close attention in world practice.

The essence of railway logistics is the organization of transportation using vehicles and infrastructure, planning, coordination and control of all stages of transportation and provision. Railway logistics management is a set of measures and actions aimed at coordinating and controlling all stages of transportation, ensuring the safety and efficiency of train traffic. In this case, delivery routes are optimized, special wagon designs, technological tools and software are used [12]. The model for optimizing a sustainable supply network in railway construction is presented in [13]. Optimization of the railway logistics management structure is a reliable means of increasing the efficiency of transport.

An important element of world logistics is maritime transportation, which provides global coverage of most countries in the world. More than 10 billion tons of various cargo are transported by sea vessels annually. Maritime logistics systems, in addition to sea transportation, also include warehousing of goods in ports, as well as distribution of cargo flows. Often, maritime transportation is part of multimodal delivery along complex routes, which also includes transportation by other modes of transport [14]. The peculiarity of maritime logistics is that it does not depend on the availability of roads and has significant flexibility in choosing routes. In addition, sea vessels are more reliable than other modes of transport, and container transportation by sea is considered a reliable means of preserving cargo. However, when implemented, they require additional transport to deliver cargo to a ship or to seaports, including insurance against loss of cargo due to shipwreck, fire, piracy. In addition, the impact of external environmental fluctuations is characterized by situations of uncertainty and risk, which significantly change the state of maritime transportation and the achievement of the final target functions of transportation. [15] describes the results of ship accident prediction using a complex regional logistics transport system and the use of sequential analysis and exponential approximation. [16] proposes a scheme for multimodal maritime transportation with low logistics costs by optimizing the distribution of transport resources while ensuring the minimization of carbon emissions. Optimization of maritime logistics is directly related to the safety and delivery times of cargo to its destination.

Aviation logistics is an integral part of the modern global logistics system along with other modes of transport. The main driving force of its development is the trend towards globalization, which creates a demand for fast, reliable and safe deliveries. Compared to other types of transportation, air transportation is distinguished by the speed of delivery, the possibility of complex routes, and the preservation of perishable goods. Logistics management of air transportation using intelligent data analysis, various metrics, and multilayer perceptron algorithms for data balancing is presented in [17]. Aviation logistics is aimed at the globalization of transport and the widespread use of artificial intelligence.

The problems of organizing transport logistics are related to loading, routing, and empty mileage. Violations of the rhythm of receipts and dispatches of goods caused by shortcomings in the transport and transshipment process management system, shortcomings in the processing capacities and capacities of seaports, the presence of sections of road routes that differ in the quality of coverage, throughput, permissible speed and periodically arising traffic jams, as well as shortcomings in the scientific and methodological basis for the selection and calculation of the main parameters of complex logical schemes do not allow the implementation of logistics chains for the movement of goods that meet to the criteria of service quality. Therefore, optimization of the structure of management of technological operations of complex logistics systems and their routes is becoming relevant. For this purpose, technologies and tools of mathematical modeling are used. A necessary condition for increasing the efficiency of transport using logistics is the widespread implementation of mathematical methods that allow finding rational and logical arguments when making management decisions to substantiate them.

PROBLEM STATEMENT

Transport modelling is divided into analytical and simulation. Analytical modelling is based on exact solutions, simplifications, and established laws, which have limited application in uncertain conditions. One of the ways to increase the efficiency of freight transportation management in conditions of uncertainty and

risk is the creation of simulation models. Simulation modelling is designed to simultaneously take into account all relevant factors and, limitations, and trends of the dynamic series, predict properties and behaviour in different situations, making adequate management decisions on this basis. The methods used in this case allow you to quickly change the management structure and choose the most optimal option [18-20]. A well-developed simulation modelling methodology is equally acceptable for managing the transport logistics of one specific type of transport, although, in practice, cargo delivery to the consumer is carried out by several types of transport.

The problems of solving management tasks under conditions of uncertainty of environmental impact are determined both by the large dimension of the management influences and the dimension of the constraint systems. Existing methods, models, and algorithms for solving similar classes of optimization problems do not allow for the full overcoming of these difficulties; therefore, it is necessary to develop new approaches and mathematical models of intellectual support suitable for transport logistics. The purpose of the work is to create a mathematical toolkit for modeling complex integrated transportation, which describes and records the properties of the state of freight transportation and its constituent elements in the dynamics of their changes.

The tasks of the work are:

- analysis and synthesis of mathematical models of transport management,
- classification of information technologies of transport logistics of complex systems,
- synchronization of computational and information processes,
- modeling of the efficiency of transport and logistics schemes.

MATERIALS AND METHODS

The materials of the work were technical features of transport, multimodal delivery of goods along complex routes, modern logical schemes.

Methods used in the work: statistical, deterministic, probabilistic, stochastic, discrete, dynamic, continuous.

PRESENTATION OF THE MAIN MATERIAL

The modern transport logistics market is a competitive environment, the management efficiency of which requires the implementation of new digital tools and methods based on the use of advanced information technologies, models and algorithms that allow for the support of making informed management decisions.

The integration of new information technologies into the practice of managing complex transport logistics schemes is presented in Fig. 1.

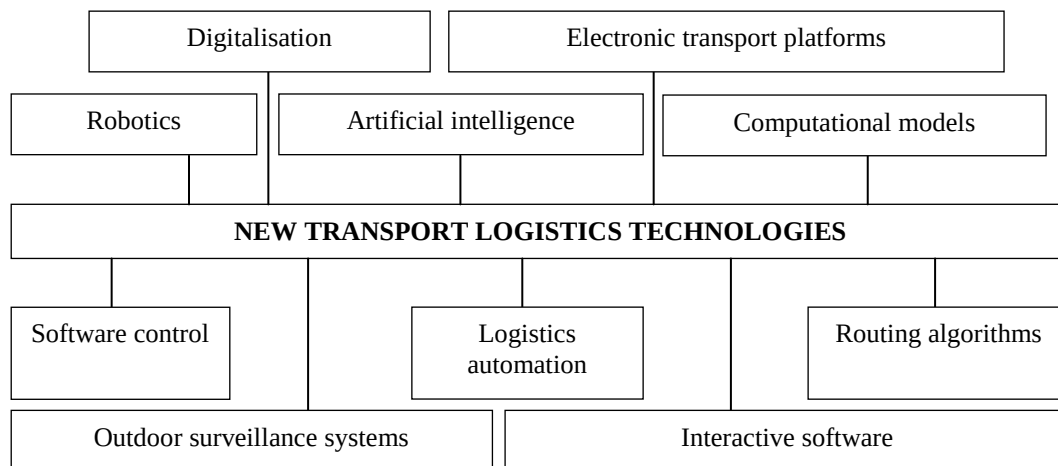


Fig. 1. Classification of new information technologies in transport logistics

The purpose and description of the structural components of the proposed classification allows for a deeper understanding of their role in the overall system of integrated transport logistics management.

Digitalization is a key factor in transport logistics systems for processing and analyzing data that are included in intelligent systems for managing and tracking cargo at all stages of its movement. The use of digitalization in intelligent management systems requires logistics companies to respond quickly to their decisions [21]. Therefore, many optimization processes are related to the level of operational management. Coordination of operational strategic decisions on logistics management is described in [22]. In [23] describes a method for optimizing transport logistics resources based on a digital twin in an intelligent cloud

environment. The method is based on optimizing and building a cloud resource change aimed at minimizing the number of vehicles.

Electronic transport platforms for digital logistics provide acceleration of document flow. The preparation of paper documentation on delivery and cargo clearance accounts for 10-15% of transport costs. With the help of properly structured data, new routes can be found [24, 25].

Robotization is a promising trend in digital logistics that automates the inventory process in warehouses, which reduces operating costs.

Artificial intelligence in transport logistics is manifested through the Internet of Things in transport (IoT), to create containers and packaging, which facilitates tracking of goods and fixing possible delays in transit. At its core, it is based on digital supply chains (DSC) and information and communication support [26]. The use of Internet of Things technology to optimize the quality of supply management of the logistics system, tracking trends and predicting possible accidents is described in [27]. Supply chain optimization based on (IoT) allows you to improve the quality of information transmission and reduce the risk of its asymmetry.

Computational models of logistics processes are a reflection of the logistics system for studying its properties and possible behavior options. The results of the model study should reveal the properties of the system that are not reflected and embedded in the source material.

Software control in the form of application programs for solving linear programming problems and optimizing high-dimensional systems ILOG is implemented in the logistics model of vertically integrated transport companies.

External surveillance systems, geoinformation schemes and geopositioning devices allow for the integration of warning systems into logistics, control the location of vehicles and RFID cargo radio frequency coding systems.

Interactive software in transport logistics allows for the automatic distribution of tasks between performers and the development of the least expensive routes. The information base contains:

- documentation formation,
- general route status,
- cargo movement dynamics,
- control functions.

Interactive software allows for consolidated transportation, combining several orders for different clients in one trip. Interactive monitoring programs are adapted to work in different countries.

Logistics automation consists in automatically arranging locations in the desired sequence and choosing the shortest route. This reduces the risk of errors, reduces travel time, and makes it possible to fulfill large orders.

Routing algorithms in logistics allow processing the flow of incoming information, planning and compiling routes, coordination, cost accounting, optimal distribution of load, parking spaces, temporary traffic jams, etc.

A synthesis of mathematical models of intelligent support for transport logistics is presented in Fig. 2.

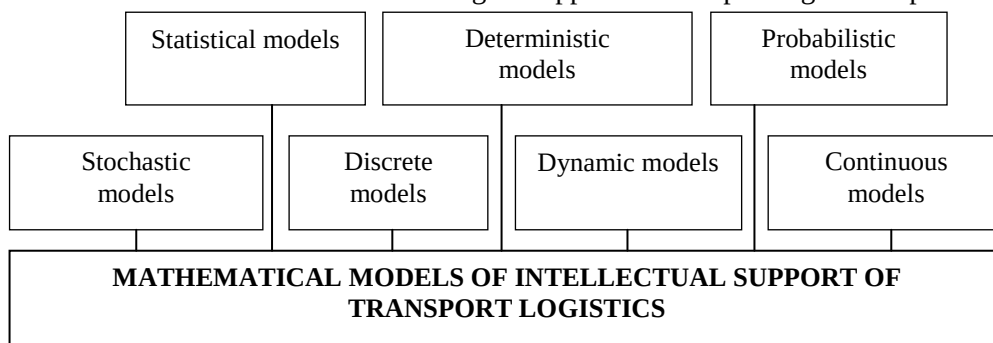


Fig. 2. Synthesis of mathematical models of intellectual support of transport logistics

Statistical processing of logistics information is intended for operational improvement of business efficiency by optimizing logistics costs for transportation operations. Statistical models require the availability of data for a long period of time when used [28, 29]. Their practical implementation under uncertainty consists in creating simulation-statistical models based on repeated reproduction of processes that are implementations of random variables with subsequent processing of information by methods of mathematical statistics.

Deterministic models are based on the assumptions that the initial information about the system parameters is uniquely described by the corresponding equations that have a single solution. A variety of such modeling is analytical representations of the freight transportation process. Deterministic models are used in the analysis of specific scenarios that occurred in both past and future events. In the context of uncertainty of external disturbances, deterministic models are not effective enough.

The use of probabilistic models assumes that part of the initial information is deterministic, and the other part is replaced by statistical characteristics of random variables and functions. Probabilistic models allow us to take into account random and unpredictable factors that exist in real life. In transport logistics, this is the density of traffic on highways, the probability of accidents, downtime due to weather conditions on the highway, etc. Models of this type allow us to predict oncoming and passing flows of freight traffic, optimize vehicle routes, and coordinate the actions of participants [30]. This is especially relevant in the context of the accelerated development of global transport networks and the growth of transportation volumes. It is promising to link together the formalization of the risks of not achieving the main goal of transportation with probabilistic models of local states of transport systems and implementation scenarios. Such a model will allow us to describe the probable states of the transport system based on statistical data. Stochastic models are built on the basis of probabilistic concepts. They are based on the determination of the probability distribution function of the variables underlying the studied process and random unforeseen excitations from the external excitation. They preserve the logical structure and sequence of alternation of stages of cargo passage along the route. When using them, there is no need to establish statistical dependencies of the sought-after quantities. Optimization of stochastic management of transport logistics using the separation of transitions of Markov processes, Monte Carlo methods, cause-and-effect structures is presented in [31].

Dynamic models reflect the interactions of the stages of cargo movement along the route. Their feature is external and functional similarity. The factors analyzed in dynamic models include the speed on the route, the time of forced delays on the road, changes in the duration and speed regime of passing individual difficult sections, and the time of reloading to other types of transport. Various subsystems of transport logistics can be in both static and dynamic states. The transition from one state to another is carried out using transition functions. The model of dynamic planning of decisions on supply chain optimization in the Chinese automotive industry is described in [9]. Dynamic models that reproduce the information field for optimizing the organization of grain transportation are described in [12].

Discrete mathematical models are based on the study of the behavior and functionality of the transport system over time. In this state of the transport system, only the moments of events change, and between these states the system changes.

The model operates only at discrete time intervals in anticipation of subsequent events in the course of the analyzed transport process. Such factors in the transport logistics of complex movements by various modes of transport include the moments of loading on the transport, the moments of unloading, warehousing, clearance and customs clearance [19]. The prospects of this type of models for transport logistics lie in taking into account the uncertainty and risk caused by possible extreme situations during the operation of vehicles. System calculation methods with elements of discrete mathematics and graph theory allow describing the state of the transport system.

Continuous mathematical models are used for continuous monitoring of transport systems that change in time, exerting operational influences on the management system. The implementation of models is carried out in terms of derived variables using differential equations [8]. In transport logistics, they can be used for various types of transport and complex schemes, observing the fast-moving processes of preservation of perishable goods, temperature, humidity and deformation processes of movement.

A summary of information support for the application of mathematical models for transport logistics of complex schemes is presented in Table 1.

Table 1 – Adaptation of mathematical models to complex transport logistics schemes

	Statistical models	Deterministic models	Probabilistic models	Dynamic models	Discrete models	Continuous models	Stochastic models
Principle of operation	Optimization of logical costs for operational activities	Formulas, laws, equations	Accounting for random and unpredictable factors	External and functional similarities	System state in discrete time intervals	Observation of cargo handling processes	Distribution functions of probabilistic variables

Manifestations	Statistical characteristics of functions and processes	Analytics of transportation and transportation conditions	Probabilistic modeling of local states of transport processes	Interaction of cargo movement elements	Accounting for risks and extreme environmental interactions	Integral and differential equations of fast-moving processes	Random fluctuations of the external environment
Prospects	Use in the automation of logistics	Use of robotics in transport logistics	Study of possible scenarios for the implementation of extreme situations	Development of routing algorithms for complex logistics schemes	Accounting for uncertainty and risk in the operation of vehicles in emergency modes	Information support of technological processes of cargo handling	Logistic structures for constructing multifunctional plans along complex routes

When modeling complex transport logistics systems, a combination of deterministic, analytical, probabilistic, stochastic and simulation-statistical methods should be used that reflect multifactorial non-stationary control processes through the reproduction of transitions from one state to another in accordance with operational rules. Such modeling is a technically difficult to implement complex task of managing technical systems characterized by multifunctionality and diversity of the structure of relations. In addition to the synthesis of mathematical models, its solution and implementation require sequential analysis in control systems of variable processes under conditions of uncertainty [30].

The real process of moving vehicles in structural-functional modeling corresponds to a sequential transition from one state to another. Cargo transportation systems in multimodal transportation include transshipment, and sometimes processing of cargo along the way in transport nodes, stations, terminals. The peculiarities of modeling such systems are in building a sequence of transport operations that are used during cargo service.

Optimization of the management structure of complex logistics schemes sets itself the goal of finding the most rational options for using available resources aimed at achieving the intended goals. This is its fundamental difference from traditional models and optimization tasks in conditions of uncertainty and lack of input information, where the search for options is infinite and only some ordering in estimates, criteria and convolutions is required. Such criteria can be the statistical criteria of Laplace, Wald, Savage, Hurwitz, as well as additive and multiplicative convolutions.

In the task of optimizing the management structure of complex logistics schemes, the number of possible management options is strictly unique and only one that satisfies the available resources needs to be found. Such a task has a unique solution, which can be achieved by a consistent analysis of complex management systems.

The mathematical description of the management of complex transport logistics schemes should begin with the establishment of the main tasks to be solved: the organization of transportation and their implementation.

In the organization of transportation, the information components will be:

- construction of a network organizational structure,
- specification of the passage of stages,
- establishment of controlled subsystems,
- determination of functional relationships between subsystems,
- coordination of interactions with subsystems,
- formation of a management model.

In the direct implementation of transportation, the information components will be:

- number of system components,
- number of discrete states,
- number of transitions of system states,
- transition probabilities,
- number of steps in the transition of the system from one state to another.

To build a network organizational structure, we will introduce the following notations. Let us denote by M the total number of control subsystems: types of transport, transportation conditions, resource constraints, speed and delivery time, etc., by U the set of options for solving control problems, and by V^n the set of possible control alternatives. Then, according to the information analysis of the available input data, the process of modeling complex transport logistics systems will have the form [30].

$$V^n = \{v_j^n\} = \prod_{i=1}^M U_j$$

$$U_j = \{U_{j(I_j)}\}; \quad j = \overline{1, N^n}; \quad I_j = \overline{1, S}; \quad N^n = \prod_{i=1}^M S_i$$

where i – number of control subsystems $i = 1, M$; j – number of stages of the route; n – number of possible options for routes between control points; I – is the number of possible implementations of the management system; S – is the number of organisational measures.

The quantitative characteristics of these values are limited by available resources.

Reliability indicator of the selected system option $v \in V^n$ cognitively through $p(v)$, then $0 \leq p(v) \leq 1$. The technical and economic characteristics of this option are denoted by $g_i(v)$, $g_i(v) \geq 0$. The quantitative values of these characteristics in the overall spectrum of tasks are determined by limiting constraints and resources. The available resource level of the selected control option for the j -th system characteristic, which, according to the accepted notation, represents the number of stages of the route, is denoted by g_i^* . This parameter is characterised by its minimum and maximum permissible values, which is indicated by the indices $i = 1, n$, $n \leq N$ for the upper level and $i = n+1, N$ for the lower level.

Taking into account the introduced notations, the general mathematical model of the processes of managing complex logistics schemes of transport will look like:

$$p(v) \rightarrow \max;$$

$$g_i(v) \leq g_i^*, \quad i = \overline{1, n};$$

$$g_i(v) \leq g_i^*, \quad i = \overline{n+1, N};$$

$$v = (v_1, \dots, v_j, \dots, v_M) \in V^n = \prod_{j=1}^M U_j$$

Here p, g_i functions of a discrete argument.

The multiplicative reliability function is called a sequential system, i.e., a system in which the failure of any subsystem k leads to the failure of the entire system. In this case, partial failures do not affect each other. In this case.

$$p(v) = \prod_{j=1}^M p_j(v_j)$$

This means that to ensure the reliability of logistics systems, it is necessary to choose a management alternative $v_j^n \in V^n$ in such a way as to ensure the successful completion of all tasks assigned to the system with probabilities of failure not less than the specified levels p_k^* , $k = 1, n$.

With this in mind, the mathematical model is transformed as follows

$$p(v) = \prod_{j=1}^M p_j(v_{j(I_j)}) \rightarrow \max;$$

$$p_k(v) = \prod_{j \in L_k} p_j(v_{j(I_j)}) \geq p_k^*, \quad k = \overline{1, r},$$

$$g_i(v) = \prod_{j=1}^M g_{i_j}(v_{j(I_j)}) \leq g_i^*, \quad i = \overline{1, n};$$

$$v = (v_1, \dots, v_j, \dots, v_M) \in V^n = \prod_{j=1}^M U_j$$

In the direct implementation of the transportation process, the information component is a dynamic process of changing the states of transport systems. The real process of moving goods along a route in the

model of managing complex transport logistics schemes corresponds to a discrete time transition, which is defined as a Markov process. In this process, the current state of the cargo along the route does not depend on past states, cataclysms and histories of the cargo being located at the point of the route under consideration.

When modeling complex logistics schemes of transport, an important aspect is to establish the interactions of the model components and transport transitions. Events are considered as the state of the transport system, and the transportation itself is a change in the system over time.

Transition probabilities P_{ji} do not depend on the moment of time, but only on j and i and are represented as a transition matrix P [31].

$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} \dots & P_{2n} \\ P_{n1} & P_{n2} \dots & P_{nn} \end{vmatrix}$$

where $0 \leq P_{ji} \leq 1$, $\sum_{i=1}^n P_{ji} = 1$

The Markov chain is assumed to be homogeneous since the transition probability P_{ji} systems from the state of i in a state of j does not depend on the vehicle location number on the route $P_{ji}(n)$.

Probability $P_{ji}(n)$ can be found using the Markov inequality

$$P_{ji}(n) = \sum P(m)P(n-m)$$

where m – the number of steps by which the logistics system moves from a state i into a state of j .

Any condition S_j can be reached from another state in a finite number of transitions. The probability of moving from one state to another is the same regardless of the number of intermediate states that must be passed through to reach the goal.

Conditional probability $P_{ji}(S)$ does not depend on the current state, i.e.

$$P_{ji}(S) = P_{ji}$$

where i – the number of the previous state,

j – the number of the nastupnogo stanu,

n – number of system components,

The transition probabilities can be represented by the following equations

$$P(x_0 = S) = q_0(S) \forall_{S \in E}$$

where $\forall$ – quantum of comprehensiveness,

S – discrete states,

q_0 – the probability of finding the system at a given time $t_0 = 0$,

x_0 – point of reference,

E – the number of possible system states.

The probability of the system passing through the stages of the route is expressed as follows

$$P(x_{n+1} = S_{n+1} | x_n = S_n) = P(S_n, S_{n+1}) \forall (S_{n+1}, S_n)$$

Transitions are possible only at points in time corresponding to the route points. By multiplying the row vector of the transition matrix P by the transition probability matrix, we obtain the probability distribution at a certain point of the route.

The complex use of intellectual support for organizational activities and transportation processes themselves in the form of structural and functional modeling is presented in Fig. 3.

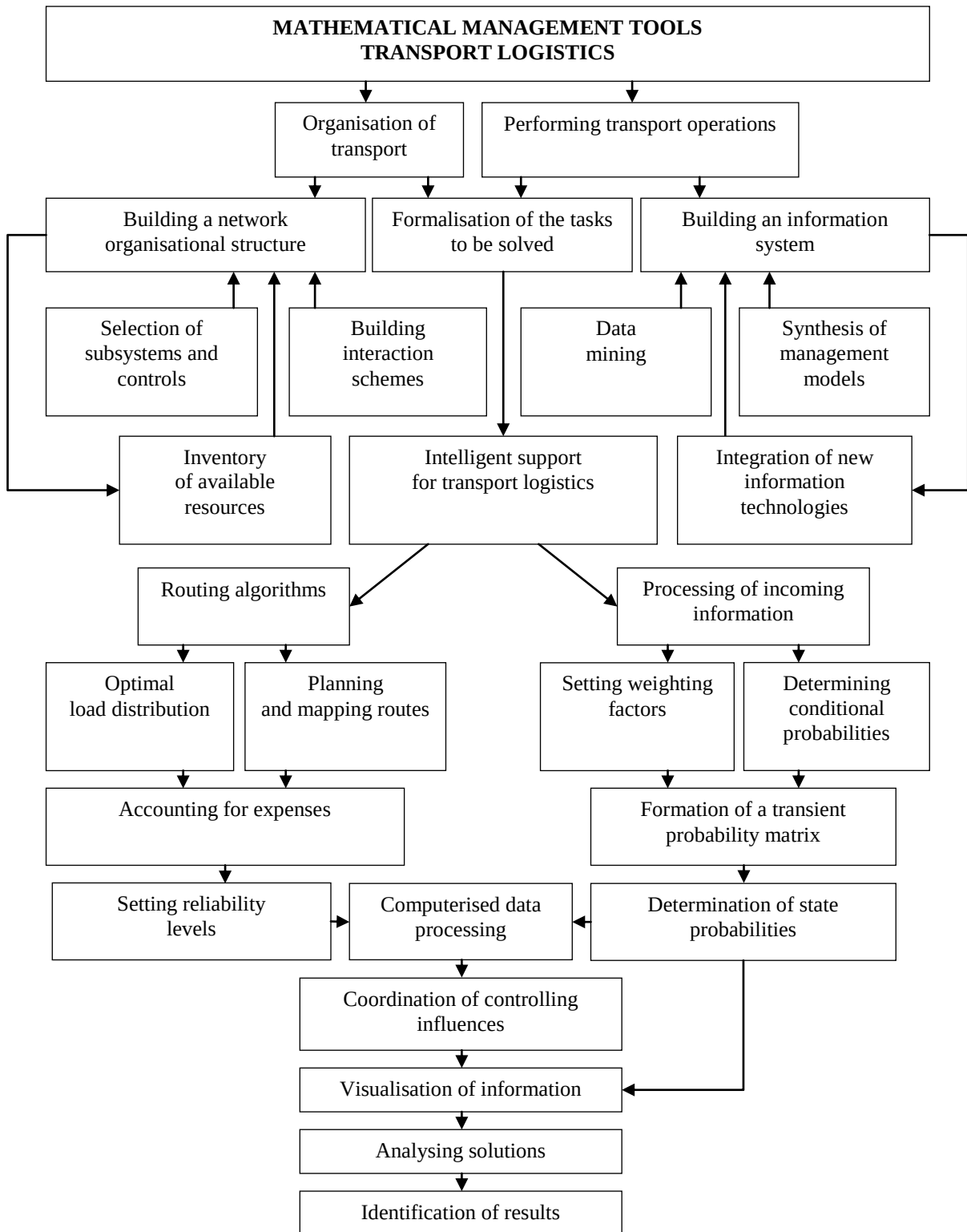


Fig. 3. Structural and functional sequence of complex logistics systems management

The essence of information analysis of processes occurring in transport and logistics systems is to collect the necessary information, exchange it with subsystems, analyze and process its use. The task of information synthesis includes substantiation of the necessary volume and forms of information presentation, methods and means of its processing, inventory and storage. Both of these areas of study are an effective means of building and researching transport logistics information systems.

The main determining factor in the analysis of a problem situation is the formalization of tasks and the establishment of the causes of its occurrence. When identifying a problem and ways to solve it, one should take into account the expansion of the problem and the identification of other related problems, without

which it cannot be solved. The formulation of the problem usually occurs at the verbal level as logical statements. Goals can be both formalized and poorly structured. They must be translated into tasks. This stage is the most important because incorrect setting of goals leads to new problems.

Using simulation modeling as a method of optimizing individual sections of the transport system, we can obtain the following scheme for implementing mathematical tools for managing complex logistics schemes (Fig. 4).

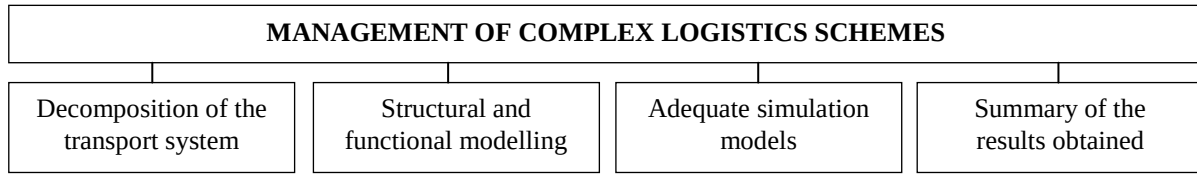


Fig. 4. Implementation of mathematical tools for managing logistics schemes

The components of the above diagram are designed to perform the following operations:

- decomposition is intended for the distribution of the transport system into some structural elements that affect the performance of the system as a whole.
- structural-functional modeling is intended for the description of complex technical processes of organizations and the sequence of actions taking into account various random factors (defects in the arrival schedule, deterioration of weather conditions, breakdowns and accidents).
- adequate simulation models are intended for adjusting control influences in different implementation options.
- generalization of the obtained results is intended for determining the degree of improvement of the analyzed logistics schemes.

The presented scheme allows synchronizing the operation of transport operations, based on traffic intensity, throughput capacity of individual sections of transport routes, optimal number of vehicles, delivery time, determination of the most loaded sections of the route.

Analysis of Fig. 1 and Fig. 2 allows us to establish the possibility of using specific information models in modern technologies for integrating artificial intelligence into logistics activities. Using the logistic concept, description of the mathematical model, limitations and conditions of possible implementation in complex freight transportation routes, one can obtain new scientific knowledge [33].

The process of system functioning can be imagined as a set of a certain number of sequences of local processes. The moments of completion of local processes in each sequence form a flow of main events that change the state of the system.

The prospects for using mathematical models for transport logistics of complex schemes can be determined by establishing their correlations with the advantages and capabilities of new information technologies.

CONCLUSIONS

1. The management structure of complex logistics schemes is a computer software system characterized by multifunctionality and diversity of relations. For its solutions and implementation, a developed mathematical toolkit for modelling the management of complex logistics schemes based on sequential analysis and synthesis of mathematical models under conditions of uncertainty is required.

2. It is shown that for solving the tasks of managing complex logistics schemes, the most promising is using structural-functional modelling based on quantitative and qualitative results using computer models and algorithms. Structural-functional modelling of processes and individual links of transport according to complex logistics schemes should be developed by the complete reflection of the existing patterns of technological connectivity and consistency of functioning both within individual modes of transport and between them.

3. In order to increase the efficiency of transportation, a set of statistical, dynamic, deterministic, stochastic and probabilistic models with discrete and continuous time and various details of specific types of transport logistics schemes with the integration of new information technologies are used for modelling.

REFERENCES

1. Pan K., Ren B., Wang T., Yu X., Kang N., Han J. Carbon Emission Accounting and Optimization of Power Equipment based on Logistics Space (2022) 2nd IEEE International Conference on Advanced

- Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing and Communication Engineering, ICATIECE 2022 DOI: 10.1109/ICATIECE56365.2022.10047295
- 2.Sun H. Design Logistics Management System Based on Computer Algorithm Model (2023) *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 373, pp. 569-575. DOI: 10.3233/FAIA230856
 - 3.Li C., Shi X. Optimisation of multi-level logistics network for agricultural products under community group buying model (2023) *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 10 (1), art. no. 2276414, DOI: 10.1080/23302674.2023.2276414
 - 4.Chen Q., Liao W. Collaborative Routing Optimization Model for Reverse Logistics of Construction and Demolition Waste from Sustainable Perspective (2022) *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (12), art. no. 7366, DOI: 10.3390/ijerph19127366
 - 5.Yang L., Sathishkumar V.E., Manickam A. Information Retrieval and Optimization in Distribution and Logistics Management Using Deep Reinforcement Learning (2023) *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 16 (1), art. no. 316166, DOI: 10.4018/IJISSCM.316166
 - 6.Sibdari S.Y., Sepasi A.H. A simulation-optimization approach for solving the forestry logistics problem (2022) *IFAC-PapersOnLine*, 55 (10), pp. 3178-3183. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.218
 - 7.Liu S. Deconstruction of Road Logistics Transportation Cost Management Evaluation Based on Optimal Solution of Linear Programming (2022) *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, art. no. 5784053, DOI: 10.1155/2022/5784053
 - 8.Song A., Yang X., Ni L., Liu C., Yao Y., Pan L. Optimization Analysis of the Emergency Logistics Identification Method Based on the Deep Learning Model under the Background of Big Data (2022) *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, art. no. 2463035, DOI: 10.1155/2022/2463035
 - 9.Qiu L. Research on Supply Chain Optimization Model Construction and Efficiency Improvement Strategy in Automobile Industry (2024) *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9 (1), art. no. 20242470, DOI: 10.2478/amns-2024-2470
 - 10.Coiret A., Vandanjon P.O., Noël R. Enhancement of Vehicle Eco-Driving Applicability through Road Infrastructure Design and Exploitation (2023) *Vehicles*, 5 (1), pp. 367-386. DOI: 10.3390/vehicles5010021
 - 11.Nguyen P.T., Nguyen T.A.T. Application of SLP and LEAN Method in Designing the Layout of Auto Parts Manufacturing Factory (2023) 2023 8th International Scientific Conference on Applying New Technology in Green Buildings, ATiGB 2023, pp. 169-175. DOI: 10.1109/ATiGB59969.2023.10364437
 - 12.Lomotko D., Arsenko D., Konovalova O., Ischuka O. Methods of infrastructure management for optimization of grain transport organization (2019) *Procedia Computer Science*, 149, pp. 500-507. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.168
 - 13.Zhang D., Li X., Zhou S., Ma X., Zhang T. Integration optimization of sustainable supply chain network in railway construction (2024) *Journal of Railway Science and Engineering*, 21 (7), pp. 2649-2659. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20231570
 - 14.Bian Z., Bai Y., Douglas W.S., Maher A., Liu X. Multi-year planning for optimal navigation channel dredging and dredged material management (2022) *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 159, art. no. 102618, DOI: 10.1016/j.tre.2022.102618
 - 15.Chai T., Xue H., Sun K., Weng J. Ship Accident Prediction Based on Improved Quantum-Behaved PSO-LSSVM (2020) *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, art. no. 8823322, DOI: 10.1155/2020/8823322
 - 16.Yin C., Ke Y., Chen J., Liu M. Interrelations between sea hub ports and inland hinterlands: Perspectives of multimodal freight transport organization and low carbon emissions (2021) *Ocean and Coastal Management*, 214, art. no. 105919, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105919
 - 17.Singh K.U., Singh S., Sajjan S., Singh T., Kumari N. Strategic Management of Airline Operations: A Comprehensive Analysis of Flight Delay Causes and Mitigation Strategies (2024) 2024 International Conference on Automation and Computation, AUTOCOM 2024, pp. 669-674. DOI: 10.1109/AUTOCOM60220.2024.10486117
 - 18.Kumar Jauhar S., Singh A., Kamble S., Tiwari S., Belhadi A. Reverse logistics for electric vehicles under uncertainty: An intelligent emergency management approach (2024) *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 192, art. no. 103806 DOI: 10.1016/j.tre.2024.103806
 - 19.Xu X., Chen Z., Song Y., Yi W. A distributionally robust optimization model for inventory-transportation integrated optimization problem of petroleum products under uncertainty (2024) *Computers and Operations Research*, 170, art. no. 106767, DOI: 10.1016/j.cor.2024.106767

- 20.Feng L., Zhao X., Chen Z., Song L. An adaptive coupled control method based on vehicles platooning for intersection controller and vehicle trajectories in mixed traffic (2024) IET Intelligent Transport Systems, 18 (8), pp. 1459-1476. DOI: 10.1049/itr2.12523
- 21.Yang L., Sathishkumar V.E., Manickam A. Information Retrieval and Optimization in Distribution and Logistics Management Using Deep Reinforcement Learning (2023) International Journal of Information Systems and Supply Chain Management, 16 (1), art. no. 316166, DOI: 10.4018/IJISSCM.316166
- 22.Kitzmann H., Strimovskaya A., Serova E. Application of Artificial Intelligence Methods for Improvement of Strategic Decision-Making in Logistics (2024) IFIP Advances in Information and Communication Technology, 698 AICT, pp. 132-143. DOI: 10.1007/978-3-031-50192-0_13
- 23.Zhang Z., Qu T., Zhang K., Zhao K., Zhang Y., Liu L., Liang J., Huang G.Q. Digital twin-based production logistics resource optimisation configuration method in smart cloud manufacturing environment (2024) IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 6 (4), art. no. e12118, DOI: 10.1049/cim2.12118
- 24.Chen Q., Liao W. Collaborative Routing Optimization Model for Reverse Logistics of Construction and Demolition Waste from Sustainable Perspective (2022) International Journal of Environmental Research and Public Health, 19 (12), art. no. 7366, DOI: 10.3390/ijerph19127366
- 25.Sibdari S.Y., Sepasi A.H. A simulation-optimization approach for solving the forestry logistics problem (2022) IFAC-PapersOnLine, 55 (10), pp. 3178-3183.
- 26.Zhu L. Optimization and Simulation for E-Commerce Supply Chain in the Internet of Things Environment (2020) Complexity, 2020, art. no. 8821128, DOI: 10.1155/2020/8821128
- 27.Bao S., Han Y., Wang L. Real-time optimization model of intelligent public transport network and its algorithm (2009) Proceedings of the 9th International Conference of Chinese Transportation Professionals, ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation System Planning, Development, and Management, 358, pp. 1662-1668. DOI: 10.1061/41064(358)233
- 28.Gusarova O.M., Yerzhanova M.E., Berezniak I.S., Konstantinov V.A., Vityutina T.A. Supply chain management in the food industry: A comprehensive hierarchical decision-making structure (2019) International Journal of Supply Chain Management, 8 (4), pp. 733-742.
- 29.Wang H., Guan J., Wang S. Optimization of Integrating Inventory and Transportation of Engineering Logistics Based on an Improved Heuristics Approach (2019) ICCREM 2019: Innovative Construction Project Management and Construction Industrialization - Proceedings of the International Conference on Construction and Real Estate Management 2019, pp. 153-160. DOI: 10.1061/9780784482308.017
- 30.Voloshin A.F., Kudin V.I. Sequential analysis of variants in problems of research and design of complex systems, monograph / A.F. Voloshin, V.I. Kudin K: "Kyiv University", 2015.-351 pp.Liu, L., Liu, S., Jusup, M. Optimizing Stochastic Control through State Transition Separability and Resource-Utility Exchange (2024) Performance Evaluation Review, 52 (2), pp. 30-32. DOI: 10.1145/3695411.3695423
- 31.Pesch T., Schröders S., Allelein H. J., Hake J. F. (2015) A new Markov-chain-related statistical approach for modelling synthetic wind power time series. New Journal of Physics, 17(2015), art. no. 055001.

Шарко О., Дорошенко О. Підвищення ефективності транспорту шляхом оптимізації структури управління складними логістичними схемами

Розвинуто математичний інструментарій моделювання транспортних перевезень у динаміці їх змін за умов невизначеності зовнішнього оточення. Наведено інформаційний аналіз та синтез процесів, що відбуваються в складних транспортно-логістичних системах, що характеризуються багатофункціональністю та різноманіттям варіантів структури відносин. Запропоновано класифікацію основних напрямів інтеграції нових інформаційних технологій у структуру управління складних схем транспортної логістики. Призначення та опис структурних складових схеми класифікації дозволяє глибше зрозуміти їхню роль у загальній системі комплексного управління транспортною логістикою. Виконано моделювання ефективності управління транспортно-логістичними схемами розподілу вантажопотоків. Розглянуто математичні моделі оптимізації процесу перевезень за складними логістичними схемами. Намічено шляхи та перспективи підвищення ефективності мультимодальних логістичних схем транспортних перевезень. Отримано практичні рекомендації щодо застосування конкретних математичних моделей у складних схемах транспортної логістики. Показано, що при вирішенні завдань оптимізації структури управління складних логістичних схем найперспективніше використання структурно-функціонального моделювання на основі кількісних та якісних результатів за допомогою комп'ютерних моделей та алгоритмів. Підвищення ефективності транспортних перевезень із боку управлінської складової досягається

шляхом удосконалення системи регулювання процесами своєчасного реагування на зміни умов перевезень.

Ключові слова: оптимізація, моделювання, транспортні перевезення, логістика, управління.

ШАРКО Олександр, Доктор технічних наук, професор кафедри транспортної технологій та судноремонту Херсонської державної морської академії, пр. Ушакова, 20. Херсон, Україна, mvsharko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9025-7990

ДОРОШЕНКО Олексій Сергійович, кафедра транспортної технологій та судноремонту Херсонської державної морської академії, пр. Ушакова, 20. Херсон, Україна, asdor144@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2999-569X

SHARKO Oleksandr Doctor of Technical sciences, Professor of Department of Transport Technology and Ship Repair, Kherson State Maritime Academy, 20, Ushakov ave. Kherson, Ukraine, mvsharko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9025-7990

DOROSHENKO Oleksii, Department of Transport Technology and Ship Repair, Kherson State Maritime Academy, 20, Ushakov ave. Kherson, Ukraine, asdor144@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2999-569X

DOI 10.36910/automash.v1i24.1712

Zybtshev Y.V., Voroshylov P.A.
Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

THE INFLUENCE OF TIRE PRESSURE ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE CAR AND RESISTANCE TO MOVEMENT

The main task of car tires is to provide the necessary grip characteristics. When the tire pressure is normal, the load at the point of contact of the tire with the road surface is distributed evenly and at the same time good controllability, maneuverability and optimal fuel consumption are ensured. The optimal pressure value for a specific car brand is determined not by the tire, but by the car manufacturer, because the same size can be mounted on different models of cars with different weights and other characteristics. Usually, information about the pressure recommended by the car manufacturer is indicated either in the technical documentation for the car, or on a plate that can be placed on the end of the driver's door, the side pillar on the driver's side, the fuel filler flap or in the glove compartment. There is the label indicates the level of cold working pressure for the front and rear wheels, the maximum load on the car and the recommended tire size. In addition, the pressure value can be affected by such factors as the weight of the car, the size of the tires, the distribution of the load inside the car and even the time of year. It should also be taken into account that the pressure can change with climate change. In summer, as the temperature rises, so does the pressure in the tires. For example, when the temperature rises to 25°C, it increases by about 0.8 bar. And if the load is full, the pressure will be even greater. That is why car manufacturers indicate the permissible pressure value for a loaded car. This is an extremely important parameter for ensuring safety, which cannot be ignored. In winter, when the air temperature drops, the pressure in the tires also drops by about 0.8 bar, which should also be taken into account when pumping up the tires. The rolling resistance coefficient f of Kleber Viaxer tires 175/70 R13 82T was estimated along the coasting path of a Lada-112 car. Increasing the air pressure by 0.05 MPa reduces f by 1.3%, decreasing the pressure by 0.05 MPa increases f by 1.7%.

Key words: tire, car, drag coefficient, friction force, acceleration, pressure, temperature.

INTRODUCTION

The automotive world is currently looking for ways to reduce CO₂ emissions.

One of the areas of search is reducing rolling resistance, which takes up a significant share of the fuel burned (and in the city, the bulk). Tire manufacturers have made significant strides in this area. The task of operators is to properly operate the car, in particular, the tires. First of all, it is necessary to maintain the recommended air pressure in them.

ANALYSIS OF LITERARY DATA AND PROBLEM STATEMENT

Tire pressure is one of the important indicators that affect the fuel consumption of any car. When the pressure decreases, the deformation zone of the tire in the contact patch increases, which leads to a noticeable increase in rolling resistance. An increase in rolling resistance leads to the engine having to consume more fuel to maintain the standard driving mode of the car.

A decrease in tire pressure and an increase in the load on the steering wheel lead to a change in the tension of the steering wheel.

Measuring the pressure on the tire resource determines and also studies the contact patch with the line.

At normal pressure, the contact patch is optimal, the load in the tire is distributed evenly. At low pressure, a higher load falls on the edges of the tire, i.e. the shoulder area, causing increased wear in this part of the tread. At high pressure, a higher load in the contact patch falls on the central part of the tread. In this case, the central part of the tire begins to wear out faster than the side blocks of the tread. Low pressure at high speed leads to unclear steering reactions (the speed of cornering decreases, the car skids more sharply, an unpleasant squeal occurs), which is unsafe, to wobbling of the rear axle on the side profile of the tire, which leads to the risk of unpredictable skidding of the car, to internal heating of the frame and, consequently, increased tire wear.

In recent years, a tire pressure monitoring system has become a mandatory additional device for passenger vehicles. Tire pressure monitoring systems can be different depending on the method by which the tire pressure is measured:

- indirect, when data on the air filling of the tire is obtained by the distance it travels in one revolution;
- direct, when special sensors are installed directly on the wheel itself that measure the pressure.

The most common and frequently used design of the tire pressure monitoring system is the first option. In essence, it is part of the electronic control unit of the ABS (anti-lock braking system), which are presented in the form of wheel speed sensors. Thus, the electronic system is able to determine the distance

traveled by the tire of each wheel. However, it cannot compare the speed of an individual wheel, since the car rarely moves in a straight line, and on turns the path of the outer wheel will always be greater than the path of the inner wheels. The control system is designed in such a way that the speed of each two wheels located diagonally is summed up, the difference is calculated from the obtained results and divided by the average speed of each wheel. Inside the system, the received data is compared with the set control parameters and if they do not match, a control lamp (indicator) lights up on the dashboard.

The advantages of such a system are:

- no need to install additional equipment, which significantly reduces the cost of the system as a whole;
- the ability to adapt it to the necessary changes in pressure parameters associated with replacing tires or other service work.

However, there are also a number of disadvantages:

- to "remember" normal parameters, the car needs to drive 30-50 km;
- after the indicator signal, the driver must visually inspect all wheels to determine if they are flat;
- the system does not allow you to determine a sharp drop in pressure (for example, if a tire is punctured);
- the system does not indicate a simultaneous drop in pressure in the wheels;
- the operability of the system is significantly affected by the degree of wheel slippage, vehicle load, and the condition of the car tires;
- in order for the indicator to light up, the pressure in the wheels must drop by at least 25-30 %;
- the tire pressure is not determined before the vehicle starts moving.

The principle of the control system with direct measurement of tire pressure is that the characteristics of the oscillatory circuit, consisting of a tire and a disk, directly depend on the elasticity of the tire, i.e. the air pressure in it.

The direct tire pressure measurement system consists of pressure sensors, a control unit, an antenna and a screen (display) and operates on the principle of measuring the pressure in each wheel.

Air pressure in a tire affects rolling resistance: with increasing pressure, the rolling resistance coefficient decreases, with decreasing pressure, it increases. This is a well-known truth, it is written in almost every article about tires, but often this information is unreliable: different authors report that a decrease in pressure by 0.01 MPa (0.1 bar) increases the rolling resistance coefficient by 2, 3 and even 5% - without indicating which tire they are talking about, how the tests were carried out, etc. Finding data on a specific modern tire is almost impossible. In the best case, the results of tests conducted by different organizations are published, and most often, as the closest, albeit indirect, indicator, the values of the coasting distance of the test car with different tires are given - but without changing the pressure.

The test we are interested in is described in [1]. The car is a Lada-112 (VAZ2112) with Kleber Viaxer 175/70R13 82T tires. The load is the driver and the operator of the Vbox Racelogic system, which measures the car's position using GPS satellite signals. The tests were carried out at a nominal pressure of 0.2 MPa (average coasting distance from a speed of 80 km/h is 1,175 m), increased to 0.25 (1,232 m, fuel consumption decreased by 1.6%) and decreased to 0.15 MPa (1,108 m, consumption increased by 2%). The braking distance was also measured, and other indicators were subjectively assessed. It was concluded that a slight decrease in fuel consumption with increased pressure and the corresponding savings in money do not compensate for the deterioration in performance properties.

AIM AND TASKS OF THE RESEARCH

The purpose of this article is to improve the accuracy of calculations of the movement of a car, for which purpose we derive the dependence of the coefficients of resistance to movement on the air pressure in the tires. To do this, we need to solve the following problems: 1) clarify the description of the resistance to the movement of a car by coasting, taking into account the air pressure in the tires; 2) find a solution to the direct problem - calculating the coasting path using the clarified description of the resistances; 3) find solution of the inverse problem - calculation of the coefficient of rolling resistance along a known coasting path.

RESEARCH RESULTS

The deceleration of the car during coasting is created by the forces of resistance to movement - aerodynamic resistance P_w , rolling resistance P_f and transmission idle resistance. The latter is usually not considered separately, it is implicitly included in the first two. Aerodynamic resistance depends on the air pressure in the tires indirectly, through the vehicle clearance [2, 3].

$$C_x = C_{x0} * (1 + 1,7 * \Delta e), \quad (1)$$

where C_{x0} is the value of C_x at nominal clearance, Δe is the change in clearance compared to nominal, m (taking into account the sign).

The clearance will change by the amount of change in tire deflection ($\Delta e = \Delta t$), and the tire deflection (m) is determined by the load on the wheel G_k (N) and the tire stiffness C_t in N/m:

$$\Delta t = G_k / C_t. \quad (2)$$

Rolling resistance is conveniently calculated using approximating polynomials [3]. Let us assume that with a moderate change in tire pressure, the shape of the curve representing the dependence of the rolling resistance coefficient f on the speed v does not change, but only its ordinates change - with the proportionality coefficient K_t . Then

$$f = K_t * (A v^2 + B v + C), \quad (3)$$

where A , B , C are the coefficients of the approximating polynomial.

Next, we can formulate a differential equation

$$dv/dt = (P_w + P_f) / m_{rm} = (k F * v^2 + K_t * (A v^2 + B v + C) * G_a) / m_{rm}, \quad (4)$$

where the streamlining coefficient $k = \rho * C_x / 2$ (ρ – air density, kg/m^3 ; C_x – aerodynamic drag coefficient); F – frontal area of the vehicle, m^2 ; m_{rm} – reduced mass of the vehicle, kg ; G_a – vehicle weight, N .

Experience shows that it is more convenient to solve this equation numerically: select the step of change in speed Δv , for each i -th interval find the average speed v_{av} , assuming that on this interval the deceleration j_i is constant; calculate the resistance forces at this average speed, from their sum find the average deceleration j_i ; then you need to calculate the duration of the i -th interval $\Delta t_i = \Delta v / j_i$ and the path of the car on this interval $\Delta S_i = \Delta t_i * v_{av}$; summing up the cumulative total, we obtain diagrams of the time and distance of the coasting from the initial speed to a complete stop. This algorithm is very easily implemented, for example, in the Microsoft Excel package. Now, by changing the coefficient K_{sh} , you can select a value for which the calculated path will be equal to the measured value. The minimum value of the coefficient of rolling resistance

$$f = C * K_t. \quad (5)$$

DISCUSSION OF THE RESEARCH RESULTS

Let us apply this method to the results described in [1].

The unladen weight of the Lada-112 is 1060 kg. We will take the weight of the driver and the tester with the equipment to be 180 kg. The sum of the reduced weights of the wheels and transmission is 37 kg. The reduced weight of the car $m_{rm} = 1060 + 180 + 37 = 1277$ kg.

According to [4], the frontal area is $F = 1.944 \text{ m}^2$, the coefficient of aerodynamic drag is $C_x = 0.335$; we will assume from [5] that on the road it will be 10% greater: $C_{xd} = 0.335 * 1.1 = 0.3685$. The weather data are not specified in the article [1], we will assume the average air density to be 1.2 kg/m^3 . Air resistance in nominal condition

$$P_w = 0,5 * 1,2 * 0,335 * 1,1 * 1,944 v^2 / 12,96 = 0,033165 v^2. \quad (6)$$

The dependence $f(v)$ for SR, TR buses at the upper limit of the field of possible values is described by the expression [3]

$$f = 3,11238 * 10^{-7} * v^2 - 1,25429 * 10^{-5} * v + 0,013005. \quad (7)$$

The stiffness of 175/70R13 82T tires can be considered approximately 170 kN/m at a pressure of 0.2 MPa, 120 at 0.15 and 220 at 0.245 MPa [6, p. 260]. The corresponding tire deflections Δt (assuming a uniform load on the wheels) are calculated using formula (2), the aerodynamic drag coefficients C_x using formula (1). The results of calculations using the described method are given in Table 1 and illustrated in Fig. 1, which shows the $f(p_w)$ graphs and the linear and quadratic approximation equations.

Additionally, the same calculation was performed in a simplified version, without taking into account the effect of tire pressure on air resistance. The results have remained practically unchanged.

CONCLUSIONS

Note that the given calculation is based on the generally accepted mathematical model of vehicle motion resistance. The actual picture is noticeably different, especially in the speed zone below 20 km/h (Fig. 2). However, taking these differences into account forces us to reconsider the accepted model of rolling resistance, which is not the purpose of this article.

Thus, the effect of changes in air pressure in the tire on rolling resistance is small. However, in high-precision calculations it must be taken into account, and our analysis provides a guideline for researchers.

Table 1 Results of rolling resistance coefficient calculations

Pressure, MPa	0,15	0,20	0,25
Δ_t , m	0,0266	0,0188	0,0145
C_x	0,3394	0,335	0,3325
Run-out distance, m	1108	1175	1232
K_t	1,13882	1,0527	0,98589
Taking into account changes in air resistance			
f	0,015489	0,014317	0,013409
Relative change f, %%	+1,64	0	-1,27
Without taking into account changes in air resistance			
f	0,015563	0,014347	0,013369
Relative change f, %%	+1,74	0	-1,32

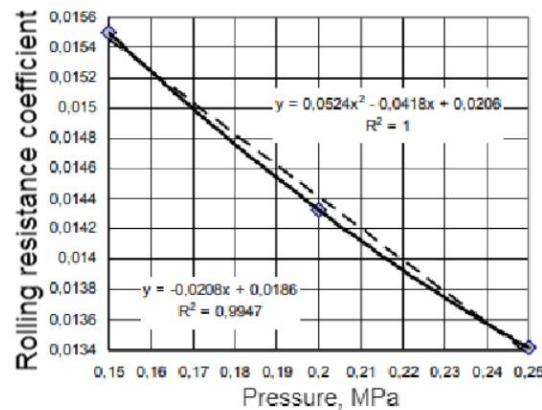


Fig. 1. Dependence of the rolling resistance coefficient of the tire 175/70R13 82T Kleber Viaxer on the internal pressure

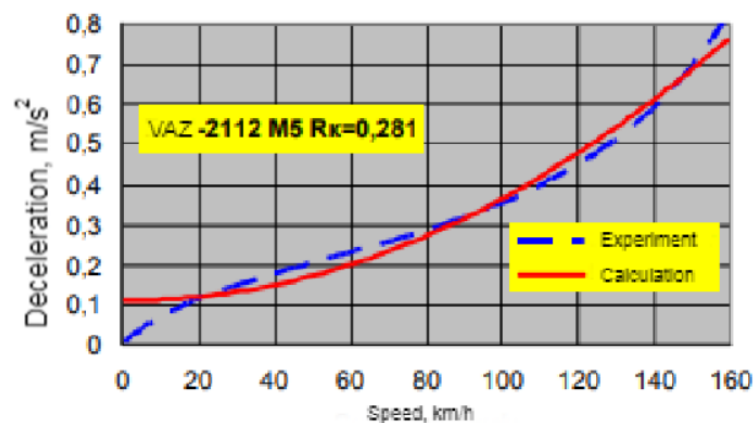


Fig. 2. Dependence $j(V)$ of the Lada-112 (VAZ-2112) car (data processing by "Autoreview")

REFERENCES

1. Evzovich V.E. Automobile tires, disks and rims / V.E. Evzovich, P.G. Raibman - M.: Avtopolis-plus. - 2010. - 144 p.
2. Knoroz V.I. et al. Operation of an automobile tire // M.: Transport. - 1976. - 238 p.
3. Baranova E. V., Baranov A. S. Methods for increasing the coefficient of tire adhesion to the road // Science and Youth. - 2020. - pp. 29-32.
4. Ryabkov A.I. Lavrenchenko V.N. (1984) Methodology for calculating the rolling resistance coefficient and the vehicle's loadability factor / Car industry - No. 3. - P. 19-20;
5. Tire resource 2017 [Electronic resource]. - Resource access mode: <http://rezina.biz.ua/faq/resurs-shin>. (date of access to the source 16.10.2024).

Ю.В. Зибцев, П.А. Ворошилов. Вплив тиску в шині на динамічні характеристики автомобіля і опір руху.

Основне завдання автомобільних шин - забезпечити необхідні зчпні характеристики. При нормальному тиску в шинах навантаження в місці контакту шини з дорожнім покриттям розподіляється рівномірно і при цьому забезпечується хороша керованість, маневреність і оптимальна витрата палива. Оптимальне значення тиску для конкретної марки автомобіля визначається не шиною, а виробником автомобіля, адже один і той же типорозмір можна встановлювати на різні моделі автомобілів з різною вагою та іншими характеристиками. Зазвичай інформація про рекомендований виробником автомобіля тиск вказується або в технічній документації на автомобіль, або на табличці, яку можна розмістити на торці водійських дверей, бічній стійці з боку водія, лючку паливної горловини або в бардачку. На табличці вказується рівень холодного робочого тиску для передніх і задніх коліс, максимальне навантаження на автомобіль і рекомендований розмір шин. Крім того, на значення тиску можуть впливати такі фактори, як вага автомобіля, розмір шин, розподіл навантаження всередині автомобіля і навіть пора року. Слід також враховувати, що тиск може змінюватися зі зміною клімату. Влітку з підвищенням температури підвищується і тиск у шинах. Наприклад, коли температура підвищується до 25°C, вона збільшується приблизно на 0,8 бар. А якщо навантаження повне, тиск буде ще більше. Тому автовиробники вказують допустиме значення тиску для навантаженого автомобіля. Це надзвичайно важливий параметр для забезпечення безпеки, який не можна ігнорувати. Взимку при зниженні температури повітря тиск у шинах також падає приблизно на 0,8 бар, що також слід враховувати при накачуванні шин. Коефіцієнт опору коченню f шини Kleber Viaxer 175/70 R13 82T оцінювали вздовж руху накатом автомобіля Лада-112. Збільшення тиску повітря на 0,05 МПа зменшує f на 1,3 %, зменшення тиску на 0,05 МПа збільшує f на 1,7 %.

Ключові слова: шина, автомобіль, коефіцієнт опору, сила тертя, прискорення, тиск, температура.

ЗИБЦЕВ Юрій Васильович, інженер, старший викладач кафедри «Технічної експлуатації і сервісу автомобілів імені Говорущенко М.Я.» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: dandz2805@gmail.com.

ВОРОШИЛОВ Павло Андрійович, студент, спеціальність: автомобільний транспорт, автомобільний факультет Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: voropasha01@gmail.com.

Yuriy ZYBTSEV, senior lecturer engineer, Department «Technical operation and service of cars named after prof. Govorushchenko N.Ya.» Kharkiv National Automobile and Road University, e-mail: dandz2805@gmail.com.

Pavlo VOROSHYLOV, student, specialty: automobile transport, automotive faculty Kharkiv National Automobile and Road University, e-mail: voropasha01@gmail.com.

Zytsev Y.V., Voroshylov P.A.
Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

EFFICIENCY OF DIFFERENT DRIVES AND TRANSMISSIONS

Based on the results of tests conducted by the independent Swedish research institute Rototest, this study provides a comprehensive statistical assessment of torque losses in automobile transmissions of various types and configurations. The analysis relies on an extensive dataset comprising over 600 vehicles produced between 1993 and 2010, including cars with manual and automatic transmissions and different types of drivetrain layouts (FWD, RWD, AWD). Measurements were obtained using hub-mounted dynamometers, which allow for direct torque evaluation at the wheel hubs and eliminate typical errors associated with traditional chassis dynamometers, such as tire slippage and rolling radius uncertainties.

The results show a noticeable difference in transmission efficiency depending on transmission type and production year. For mechanical transmissions, the average efficiency before 2004 is estimated at approximately 0.91, whereas for vehicles produced after 2005 it reaches up to 0.96—suggesting significant advancements in design precision, materials, and lubrication systems. Automatic transmissions, on the other hand, exhibit relatively stable efficiency levels around 0.89, with losses generally higher than in manual systems, regardless of drive layout.

The study also explores the modal and average values of power losses across different configurations, highlighting that front- and rear-wheel-drive vehicles with manual gearboxes exhibit lower losses compared to their automatic counterparts. Despite ongoing development in automatic systems, such as torque converter lock-up mechanisms and multi-speed designs, their efficiency gains remain limited in practice.

These findings emphasize the importance of statistically grounded, independent testing for evaluating drivetrain performance and provide valuable insights for manufacturers, engineers, and policymakers focused on improving vehicle energy efficiency.

Key words: transmission, car, manual transmission, automatic transmission, wheel, front wheel drive, rear wheel drive, full wheel drive.

INTRODUCTION

The automobile transmission is a fundamental component of the powertrain, responsible for transmitting torque from the engine to the drive wheels. It plays a critical role in determining not only the vehicle's dynamic performance but also its overall fuel consumption and environmental impact. As global regulatory standards for fuel economy and emissions become increasingly stringent, improving the efficiency of drivetrain systems—including the transmission—has become a central focus for both automotive manufacturers and researchers [1].

One of the primary metrics used to evaluate the performance of a transmission system is the efficiency coefficient (EC), which expresses the ratio of useful mechanical power delivered to the wheels to the total power output of the engine. In other words, the EC reflects how much of the engine's energy is preserved and used for propulsion, rather than being lost due to internal resistance, friction, fluid dynamics, and other parasitic effects within the transmission.

Transmission efficiency is influenced by a wide range of factors, including:

- Type of transmission (manual, automatic, CVT, dual-clutch),
- Drive configuration (front-wheel drive, rear-wheel drive, all-wheel drive),
- Mechanical design and component precision,
- Lubrication quality and oil viscosity,
- Load conditions, gear ratios, and driving modes,
- Thermal conditions and wear over time.

Traditionally, values for transmission efficiency have been based on standardized estimates or manufacturer data, often ranging from 85% to 97% depending on the configuration [2]. However, many of these figures lack transparency and may not reflect real-world conditions. In some cases, values reported by automakers are optimized for marketing purposes and do not account for variations due to aging, wear, or temperature-dependent fluid losses.

To address this, researchers have increasingly turned to statistical evaluation methods, which allow for the analysis of large data sets collected from laboratory tests and real-world vehicle measurements. These methods provide a more objective and reliable assessment of transmission efficiency, as they can reveal distributions, identify average losses across different vehicle types, and expose outliers that might indicate mechanical faults or data inconsistencies (Fig.1).

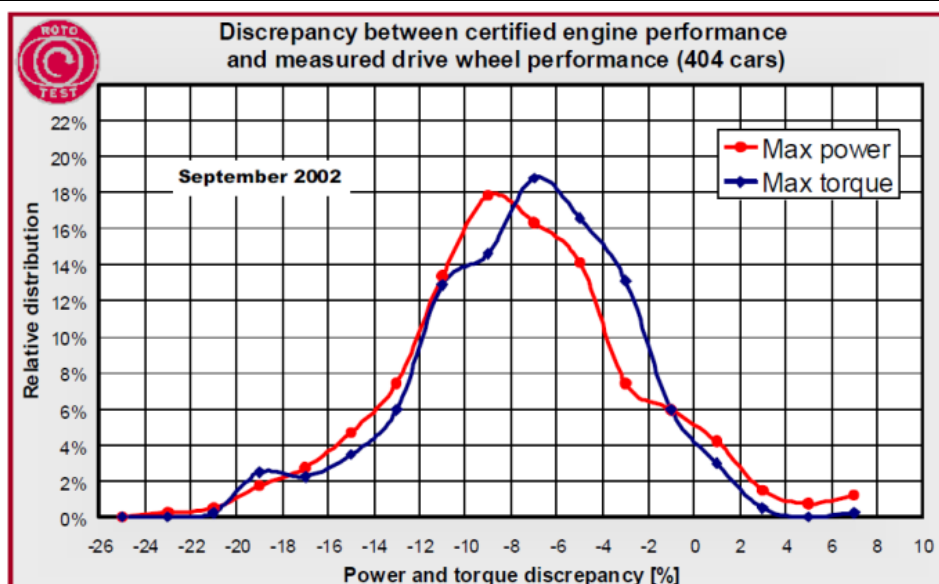


Fig. 1. Discrepancy between the passport performance indicators and the values dependent on the drive wheels [4].

One of the most notable contributors to independent transmission testing is the Rototest Research Institute, which has developed specialized dynamometer stands capable of measuring power output directly at the wheel hubs [3]. This testing approach eliminates many of the variables and inaccuracies associated with traditional chassis dynamometers, such as tire slip or unknown rolling radius, thereby allowing for more accurate isolation of transmission losses.

This paper aims to explore the principles of statistical evaluation of transmission efficiency, drawing upon publicly available data and independent testing methodologies. It also seeks to investigate how different design configurations and operational parameters affect efficiency, and what insights can be drawn to support future improvements in transmission design and control strategies.

Ultimately, understanding the real-world efficiency of transmissions is essential not only for engineers involved in powertrain optimization but also for policy-makers, fleet operators, and environmentally conscious consumers who seek to reduce energy consumption and emissions across the transportation sector.

ANALYSIS OF LITERARY DATA AND PROBLEM STATEMENT

The study of resistance forces in automobile transmissions has a long history: as early as the 1930s and 1940s [1], the first generalized estimates of the efficiency of mechanical transmissions were formulated. According to these data, for cars with one driving axle, the efficiency was from 0.9 to 0.95, and for cars with two and three driving axles - from 0.85 to 0.9. These values are still cited in educational literature and used in engineering calculations.

Modern sources, especially publications of automobile manufacturers, often report higher efficiency values - up to 0.97, in particular, for dual-clutch transmissions. However, such data are often of an advertising nature and are not always confirmed by independent measurements. This creates the problem of objectively assessing the real efficiency of modern car transmissions.

One of the few independent sources of reliable information is research conducted by the Swedish research institute Rototest Research Institute. This organization uses specially designed dynamometer stands that allow precise measurement of torque without the use of tires and rollers, eliminating common errors in traditional measurements. This allows us to obtain data on losses specifically in the transmission, without the influence of other factors.

AIM AND TASKS OF THE RESEARCH

The objective of this study is to statistically evaluate the efficiency of automobile transmissions based on data obtained by bench testing.

To achieve this goal, the following tasks were set:

- to conduct a literature review and evaluate existing data on transmission efficiency;
- to analyze an array of open data collected by the Rototest Research Institute in order to identify average and most probable values of transmission losses;
- to evaluate the differences in efficiency depending on the transmission type (manual, automatic), as well as the type of drive (front, rear, all-wheel drive);

- to analyze the dynamics of changes in transmission efficiency depending on the year of vehicle production.

RESEARCH RESULTS

During the statistical processing of the data collected by Rototest, the characteristics of more than 600 cars manufactured between 1995 and 2010 were analyzed (Fig.2). The results reflect the real losses in the drivetrain, defined as the difference between the rated engine power and the power transmitted to the wheels.

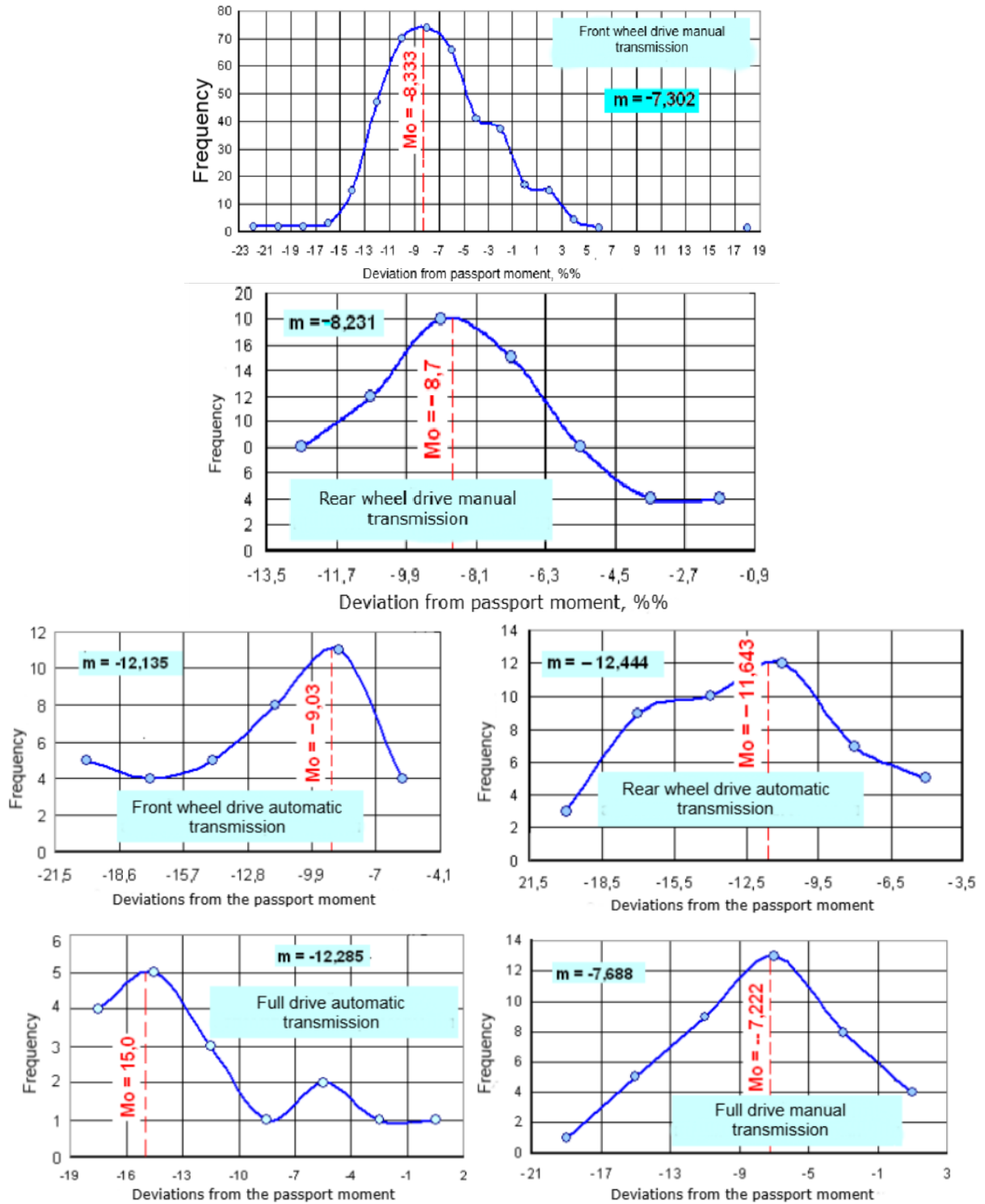


Fig.2. Distributions of deviations of measured torque values from the passport values

Key quantitative results:

- The average level of losses in the drivetrain was about 7-9% of the rated power.
- The most probable values of losses (mode) are 7% for torque and 9% for power.

- Automatic transmissions show an average loss of 12.3%, and a mode of 10.75%.
- Manual transmissions generally show lower losses, especially in newer cars.
- The type of drive (front or rear) has a minor effect on efficiency; the differences between them are within the statistical error.
- All-wheel drive has higher losses, but the sample size is insufficient for reliable conclusions (Tab. 1).

Table 1 Average differences between measured and passport torque values for different categories of passenger cars

Transmission Type	Drive Type	Sample Size	Mean Loss (%)	Mode Loss (%)
Manual	Front-wheel drive (FWD)	396	-7.302	-8.333
	Rear-wheel drive (RWD)	69	-8.231	-8.7
	All-wheel drive (AWD)	40	-7.688	-7.222
Automatic	Front-wheel drive (FWD)	37	-12.135	-9.03
	Rear-wheel drive (RWD)	46	-12.444	-11.643
	All-wheel drive (AWD)	17	-12.285	-15

- When comparing vehicles by year of production, a reduction in losses was found only for mechanical transmissions.

DISCUSSION OF THE RESEARCH RESULTS

The results of the analysis confirm that real losses in the transmission depend significantly on its design and technical condition. The data obtained cast doubt on the overly optimistic efficiency values stated in advertising materials.

Despite the active introduction of torque converter locking technologies, automatic transmissions are, on average, inferior to mechanical ones in terms of efficiency. This is explained by a more complex design, the presence of hydraulic systems and additional internal friction.

Interestingly, mechanical transmissions have shown a steady trend towards reducing losses over the past decades. This is probably due to the use of more advanced bearings, improved manufacturing accuracy, the use of low-viscosity transmission oils and the introduction of new-generation synchronizers.

It is also worth noting that the spread of losses among different car models can reach 25%, which is due to both design features and the condition of the transmission units. This emphasizes the need for an individual approach when assessing the efficiency of a particular vehicle.

CONCLUSIONS

Thus, based on the modal values of losses, the following transmission efficiency values can be considered the most probable:

- manual transmission, front and rear wheel drive, cars produced in 1995-2004 - 0.91; cars produced in 2005-2010 - 0.96;
- automatic transmission, all types of drive - 0.89.

REFERENCES

- 1.Kislikov V.F., V.V. Lushchik. Future operation of vehicles. Kiev: Libid, 2018. – 400 p.
2. Dubyansky O.V., Khrun V.M. Design and design of the car: navch. pos_b. Part 1: Vehicle transmission. – Lviv: View of Lviv. Polytechnics, 2014. – 170 p.
- 3.Website of the research institute Rototest (Sweden) <http://www.rototest.com> (date of access to the source 04.04.2025).
- 4.Sirota V.I., Sakhno V.P., Kovalchuk G.O., Polyakov V.M., Sakno O.P., Lisiy O.V. Cars. Fundamentals of design, theory: beginning. allowance: 3rd type, additional. and processed – Odessa: Military Academy, 2016. – 355 p.

Ю.В. Зибцев, П.А. Ворошилов. Ефективність різних приводів трансмісій.

На основі результатів випробувань, проведених незалежним шведським дослідницьким інститутом Rototest, це дослідження дає комплексну статистичну оцінку втрат моменту, що крутить, в автомобільних трансмісіях різних типів і конфігурацій. Аналіз ґрунтується на великому наборі даних, що включає понад 600 транспортних засобів, випущених у період з 1993 по 2010 рік, включаючи

автомобілі з механічною та автоматичною трансмісією та різними типами схем трансмісії (FWD, RWD, AWD). Вимірювання були отримані за допомогою динамометрів, встановлених на маточині, які дозволяють безпосередньо оцінювати крутний момент на маточках коліс і усувають типові помилки, пов'язані з традиційними динамометрами шасі, такими як прослизання шин і невизначеність радіусу кочення. Результати показують помітну різницю в ефективності трансмісії в залежності від типу трансмісії та року випуску. Для механічних трансмісій середній ККД до 2004 року оцінюється приблизно в 0,91, тоді як для транспортних засобів, випущених після 2005 року, він досягає 0,96, що свідчить про значний прогрес у точності проектування, матеріалах та системах мастила. З іншого боку, автоматичні трансмісії демонструють відносно стабільні рівні ефективності близько 0,89, причому втрати зазвичай вищі, ніж у ручних системах, незалежно від схеми приводу.

Дослідження також вивчає модальні та середні значення втрат потужності у різних конфігураціях, підкреслюючи, що автомобілі з переднім та заднім приводом та ручними коробками передач демонструють нижчі втрати в порівнянні з їх автоматичними аналогами. Незважаючи на розвиток автоматичних систем, таких як механізми блокування гідротрансформатора і багатошвидкісні конструкції, їх приріст ефективності залишається обмеженим на практиці.

Ці результати наголошують на важливості статистично обґрунтованого незалежного тестування для оцінки продуктивності трансмісії та надають цінну інформацію виробникам, інженерам та політикам, зосередженим на підвищенні енергоефективності транспортних засобів.

Ключові слова: трансмісія, автомобіль, ручна КПП, автоматична КПП, колесо, передній привод, задній привод, повний привод.

ЗИБЦЕВ Юрій Васильович, інженер, старший викладач кафедри «Технічної експлуатації і сервісу автомобілів імені Говорущенко М.Я.» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: dandz2805@gmail.com.

ВОРОШИЛОВ Павло Андрійович, студент, спеціальність: автомобільний транспорт, автомобільний факультет Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: voropasha01@gmail.com.

Yuri ZYBTSEV, senior lecturer engineer, Department «Technical operation and service of cars named after prof. Govorushchenko N.Ya.» Kharkiv National Automobile and Road University, e-mail: dandz2805@gmail.com.

Pavlo VOROSHYLOV, student, specialty: automobile transport, automotive faculty Kharkiv National Automobile and Road University, e-mail: voropasha01@gmail.com.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1714

Бойків Р.В.

*Національний університет «Львівська політехніка», вул. Бандери 12, м. Львів, Україна***АНАЛІЗ ГРАНИЧНИХ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ НА НЕРЕГУЛЬОВАНОМУ ПЕРЕХРЕСТІ З ІНТЕНСИВНИМ ЛІВОПОРОТНИМ ПОТОКОМ**

В роботі проведено аналіз основних характеристик транспортного потоку в зоні нерегульованого перехрестя та їх вплив на формування граничних часових інтервалів на головному напрямку з урахуванням частки лівоповоротних транспортних засобів. На перехресті існує значна інтенсивність руху на всіх підходах, оскільки через нього проходить дорога національного значення Н17 та автомагістраль міжнародного значення М06. Перехрестя характеризується всіма дозволеними маневрами, високим відсотком вантажних і поворотних транспортних засобів з головної дороги.

В результаті досліджень умов руху та параметрів транспортного потоку на перехресті встановлено, що інтенсивність руху на головній дорозі у різні періоди доби складає більше 1000 авто./год, а частка лівоповоротних транспортних засобів коливається від 10 до 30%. На основі цього на головному напрямку нерегульованого перехрестя визначено тривалість граничних інтервалів у транспортному потоці. Встановлено, що після росту інтенсивності руху прямоїдучого транспортного потоку на головній дорозі нерегульованого перехрестя понад 700 авто./год. граничний часовий інтервал починати зростати більше 10с. З'ясовано, що при збільшенні частки лівоповоротних транспортних засобів з головної дороги, тривалість граничних інтервалів на нерегульованому перехресті у транспортному потоці коливається в межах 20-25 с. Аналіз граничних часових інтервалів на головній дорозі вказує, що на безпечні режими руху на нерегульованому перехресті впливає розподіл інтенсивності руху за напрямками руху, неоднорідність транспортного потоку та частка лівопоротних транспортних засобів.

Результати досліджень доцільно брати до уваги під вдосконалення існуючих схем організації руху на нерегульованих перехрестях. Під час визначення дозволених напрямків руху з головної дороги, необхідно враховувати закономірності зміни часових інтервалів у транспортному потоці, оскільки за певних обставин вони можуть перевищувати критичні значення і створювати потенцію небезпеки руху в зоні перехрестя.

Ключові слова: транспортний потік, нерегульоване перехрестя, інтенсивність руху, смуга руху, лівоповоротні транспортні засоби, граничний інтервал руху.

ВСТУП

Вдосконалення організації руху на перехрестях магістральних вулиць зазвичай пов'язані тільки зі зміною дозволених маневрів руху, оптимізацією пофазного роз'їзду та роботою світлофорної сигналізації чи каналізації напрямків руху. Такі підходи в обмежений термін часу дають можливість частково збільшити пропускну здатність перехресть без здійснення кардинальної зміни їх геометричних особливостей.

Вдосконалення схем дорожнього руху на нерегульованих перехрестях та розроблення режимів роботи світлофорної сигналізації на нерегульованих перехрестях базується на вхідних даних, які включають дослідження основних параметрів транспортного потоку (ТП). Неоднорідність ТП на мережі доріг, особливо на нерегульованих перехрестях, негативно відбивається на ефективності їх роботи, навіть із ростом інтенсивності руху на одному із підходів перехрестя. Різні за своїми типами і динамічними характеристиками ТЗ під час здійснення поворотного маневру в зоні перехресть, залежно від дозволених напрямків руху, знижують пропускну здатність перехрестя та підвищують потенційну небезпеку всього перехрестя.

Досліджувана ділянка цього дослідження є нерегульоване перехрестя дороги міжнародного значення М06 і дороги національного значення Н17, поблизу населеного пункту Гамаліївка. Інтенсивність руху на ділянці є достатньо великою, у зоні перехрестя та на його підходах спостерігається значна частка вантажного транспорту (з корисним навантаженням п'ять і більше тон). Пішохідні потоки на даному перехресті відсутні. Це свідчить, що значного впливу на затримки транспорту безпосередньо перед перехрестям вони не здійснюють. Перехрестя є нерегульованим, проте воно фактично розділено на дві частини. Перша частина - це прямоїдучі транспортні потоки, які рухаються в головному напрямку і включають частку лівоповоротних транспортних засобів. Друга частина – це невелике кільце для саморегульованого руху діаметром всього 30м, створене для того, щоб учасники дорожнього руху, які здійснюють рух з другорядного напрямку, а також ті, що з'їжджають з головної дороги, мали змогу безперешкодно роз'їхатись з меншою кількістю конфліктних точок.

Значно понижують безпеку руху на перехресті лівоповоротні транспортні засоби, тому в даній роботі буде досліджуватись граничний часовий інтервал для лівоповоротних транспортних засобів під час різної інтенсивності прямоїдучих транспортних засобів на головному напрямку. Це дасть можливість розробити заходи вдосконалення організації дорожнього руху та підвищення безпеки руху на нерегульованому перехресті.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Під час міграції населення та переміщення промислових об'єктів у зв'язку із війною у нашій державі, особливо актуальним стає дослідження впливу розподілу транспортних потоків на транспортну інфраструктуру і ВДМ [1]. Таке завантаження мережі не тільки порушує звичні транспортні зв'язки, але й критично впливає на мобільність та безпеку руху у транспортних вузлах. Дані про інтенсивність і склад транспортного потоку є дуже важливим для проектування, оцінки та визначення пріоритетів, тому вони повинні бути максимально точними [2].

Безпека руху на ВДМ залежить від способу організації руху. На перехрестях із світлофорним регулюванням переважають два види дорожньо-транспортних пригод (ДТП): наїзд на автомобіль, що різко зупинився та зіткнення з автомобілем, що рухався на заборонений сигнал світлофору. На нерегульованих перехрестях, де дороги, які перетинаються, діляться на головну і другорядну, безпека руху залежить від дотримання правил почергового проїзду та часу знаходження автомобілів другорядного напрямку в конфліктній зоні. На міських нерегульованих перехрестях безпека руху визначається планувальним рішенням перехрестя та інтенсивністю руху автомобілів і пішоходів. Чим вище інтенсивність по другорядній дорозі і чим ближче вона до інтенсивності на головній дорозі, тим частіше на перехресті порушується правило черговості проїзду та створюється конфліктна ситуація [3]. Перетин траєкторій руху двох транспортних потоків вимагає від водіїв другорядного напрямку пошуку прийнятного проміжку часу між транспортними засобами на головному напрямку для виконання маневру перетину або злиття. На величину цього прийнятного інтервалу впливають: геометричні характеристики перехрестя (кут перетину проїзних частин, поздовжні ухили на підходах, кількість смуг руху на головному напрямку, видимість зони перехрестя тощо); дорожньо-кліматичні умови (тип та стан покриття, опади, температура повітря тощо); характеристики транспортних потоків (інтенсивність руху, склад транспортного потоку; дозволені швидкості руху тощо); вибір подальшого напрямку руху (перетин основного потоку або злиття з ним); спосіб організації пішохідного руху; психофізіологічні особливості водія. Кожен з цих чинників має важливе значення і за визначення пропускну здатності перехрестя і не може бути знехтуваний [4].

У роботі [5] відображено результати дослідження, де зазначається, що збільшення частки лівоповоротних транспортних засобів на смузі руху призводить до росту довжини черги перед перехрестям. Такі результати свідчать про те, що при виборі схеми організації руху на перехрестях необхідно враховувати інтенсивність транспортного потоку, але і частку поворотних транспортних засобів.

Проведені дослідження, які присвячені розробці методу вибору раціональних режимів світлофорного регулювання на перехрестях, вказують що інтенсивність руху на перехресті здійснює вплив на кількість на схильність пішоходів порушувати правила переходу проїзної частини [6].

Аналіз безпеки руху на нерегульованих перехрестях вулиць є актуальним завданням у містах, особливо коли мова йде про багатосмугові проїзні частини на їх підходах. Така небезпека в зоні перехрестя пов'язана із значною неоднорідністю транспортного потоку за складом. Авторами у своїй праці [7] запропоновано оцінку безпеки дорожнього руху на нерегульованих перехрестях за допомогою конфліктуючих транспортних потоків із урахуванням швидкості руху конфліктуючого автомобіля на головній дорозі. Однак така концепція оцінки безпечних режимів не враховує склад транспортних потоків, які конфліктують.

Якщо брати до уваги умови руху на Т-подібному перехресті, то в дослідженнях [8-9], які спрямовані на оцінку конфліктних ситуацій на нерегульованих перехрестях, результати показали, що ймовірність виникнення ДТП або зіткнення ТЗ суттєво залежить від складу транспортного потоку у зоні конфліктуючих ТП. Тобто можна зазначити, що рівень безпеки на перехрестях суттєво змінюється за умов змішаного ТП, а ймовірність зіткнення в зоні перехрестя залежить залежно від типу та поєднання транспортних засобів, їх інтенсивності та складу потоку.

У процесі дорожнього руху розрахункова пропускна спроможність вулиць і доріг, попри її нормативне значення, змінюється під впливом таких факторів, як кліматичні умови, ремонтні роботи, дорожньо-транспортні пригоди та нерівномірність інтенсивності транспортних потоків [10]. На підставі цього, мета управління і завдання збільшення пропускну здатності на нерегульованих

перехрестях полягає в узгодженні реальної пропускної спроможності кожного підходу перехрестя з інтенсивністю у різні періоди доби.

Часті затори зумовлені недостатньою пропускною спроможністю дорожньої інфраструктури та низькою швидкістю руху транспортного потоку, що спричинене великою часткою вантажних автомобілів, які рухаються повільніше, і на вузьких ділянках доріг маневр обгону є неможливим. У цей важкий період війни до західних регіонів вимушено перемістилися багато людей, а також приватних підприємств за програмою релокації від держави. Це все спричиняє величезне навантаження на транспортну інфраструктуру регіону. Приміські території та промислові зони міст заповнюються вантажним транспортом, який, у свою чергу, сповільнює транспортний потік на об'їзних, кільцевих і міських дорогах.

З огляду на це, основною метою цього дослідження є встановлення тривалостей часових інтервалів, які виникають на нерегульованому перехресті автодороги міжнародного значення М06 з дорогою національного значення Н17 поблизу населеного пункту Гамаліївка за існуючої схеми організації руху. Так як на перехресті спостерігаються інтенсивні транспортні потоки, значну частку яких становить вантажний транспорт.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз граничних часових інтервалів на головній дорозі нерегульованого перехрестя із значною інтенсивністю руху за різної частки лівопоротних транспортних засобів.

Це дасть можливість обґрунтувати оптимальні параметри транспортного потоку за яких нерегульоване перехрестя буде функціонувати з найменшими затримками руху, де присутній значний рух лівопоротних транспортних засобів. Для досягнення мети роботи, необхідно виконати вирішити такі задачі: провести експериментальні дослідження основних показників транспортного потоку у різні періоди доби, дослідити планувальні особливості перехрестя, визначити зміну граничних часових інтервалів руху на головному напрямку нерегульованого перехрестя, виявити закономірності зміни граничного часового інтервалу за різної частки лівоповоротних транспортних засобів з головної дороги.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Рух транспортних засобів в міському середовищі та за межами міста суттєво відрізняються. Поза містом, особливо на автомобільних магістралях міжнародного і національного значення, середня швидкість руху є вищою, а склад транспортного потоку більше насичений вантажними автомобілями вантажопідйомністю понад 6 тон. На перехресті проведено аналіз планувальних особливостей, які зображено на рисунку 1.

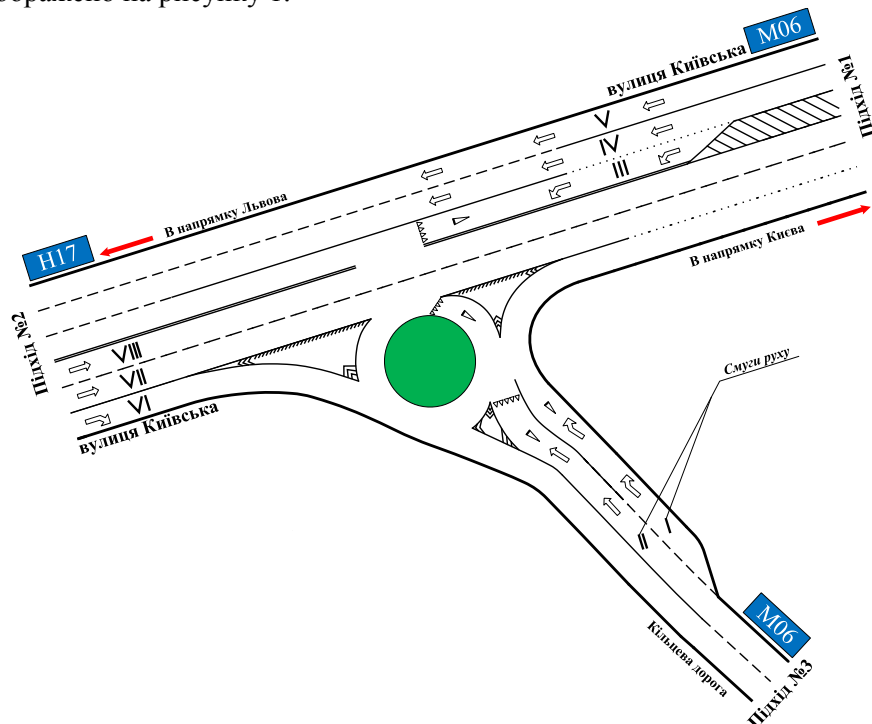


Рисунок 1 – Планувальні особливості перехрестя Кільцевої дороги-вул. Київська (Н17)

Перехрестя має три підходи та є Т-подібного типу. Перехрестя є нерегульованим, а головний напрямок це прямоїдучі транспортні засоби по вулиці Київській. На перехресті є вісім смуг руху, дві з яких це виїзд з другорядної дороги, якою в даному випадку є Кільцева дорога.

В кожному з головних напрямів є окремі поворотні смуги. В напрямку Києва це правоповоротні транспортні засоби, які повертають на Кільцеву дорогу, а у напрямку Львова - лівоповоротні транспортні засоби, які створюють найбільшу небезпеку на перехресті, оскільки перетинають потік транспортних засобів, які рухаються головним напрямом, а також перетинаються з лівоповоротними транспортними засобами, що повертають ліворуч з Кільцевої дороги.

Натурні дослідження інтенсивності транспортного потоку проведено у різні дні тижня та пікові періоди руху. Було вибрано: понеділок о 8:00 та п'ятниця о 18:00. Ці дні було вибрані не випадково - мета полягала в тому, щоб якомога точніше визначити інтенсивність та склад ТП на перехресті під час максимального навантаження на нього транспортних засобів. Для порівняння в дослідженнях інтенсивності транспортного потоку на перехресті також було обрано суботу, 13:00. Це дало змогу наочно порівняти піковий час початку робочого тижня (понеділок 8:00), піковий час закінчення робочого тижня (п'ятниця 18:00), а також міжпіковий період (субота 13:00). Всі натурні дослідження інтенсивності руху у різні дні тижня та періоди доби за напрямками руху на перехресті зображено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Результати дослідження інтенсивності руху транспортних потоків за напрямками на перехресті у різні періоди доби

<i>Натурні дослідження станом на понеділок 8:00</i>					
Підхід №1 1070 авто/год		Підхід №2 1213 авто/год		Підхід №3 788 авто/год	
Прямийдучі 729 авто/год	Лівоповоротні 341 авто/год	Прямийдучі 849 авто/год	Правоповоротні 364 авто/год	Лівоповоротні 202 авто/год	Правоповоротні 586 авто/год
<i>Натурні дослідження станом на п'ятницю 18:00</i>					
Підхід №1 1155 авто/год		Підхід №2 1310 авто/год		Підхід №3 850 авто/год	
Прямийдучі 787 авто/год	Лівоповоротні 368 авто/год	Прямийдучі 917 авто/год	Правоповоротні 393 авто/год	Лівоповоротні 218 авто/год	Правоповоротні 632 авто/год
<i>Натурні дослідження станом на суботу 13:00</i>					
Підхід №1 835 авто/год		Підхід №2 947 авто/год		Підхід №3 614 авто/год	
Прямийдучі 569 авто/год	Лівоповоротні 266 авто/год	Прямийдучі 663 авто/год	Правоповоротні 284 авто/год	Лівоповоротні 157 авто/год	Правоповоротні 457 авто/год

Згідно зведених даних інтенсивності транспортного потоку у різні періоди доби можна зазначити, що існують значні інтенсивності на всіх підходах нерегульованого перехрестя. Найбільші інтенсивності зафіксовано за напрямком головної дороги на перехресті (підхід №1 та №2). На кожному з підходів загальна інтенсивність складалась із сумарної інтенсивності руху всіх дозволених напрямків. Найбільше навантаження на перехресті спостерігається у вечірній піковий період в п'ятницю, інтенсивність руху на загалом перехресті у цей період складає 3315 авто/год.

Якщо брати до уваги головний напрямок дороги нерегульованого перехрестя, то у транспортному потоці переважають прямоїдучі транспортні засоби. Частка правоповоротних потоків коливається у межах 10-30% залежно від підходу. На головному напрямку перехрестя також існує значна частка лівоповоротних потоків, яка змінюється від росту загальної інтенсивності руху на підході в різні періоди доби.

Аналіз показників інтенсивності руху за напрямками на нерегульованого перехрестя вказує, що найбільш завантаженим напрямком у будь-який період дня є напрямок де рухаються прямоїдучі ТП. Також на перехресті існує значна інтенсивність лівоповоротного потоку з головної дороги, що свідчить про транзитний характер руху більшості ТЗ у транспортному потоці.

У різні періоди дослідження інтенсивності руху на перехресті, встановлено, що найбільша частка лівоповоротних зафіксована на головному напрямку дороги з підходу №1. Залежно від періоду дослідження, частка цього маневру в структурі всього транспортного потоку коливалась від 10 до 30%. Графічне зображення інтенсивності руху за напрямками на перехресті в піковий період руху у п'ятницю (18:00 год) зображено на рисунку 2.

Натурні дослідження фактичної інтенсивності руху транспорту показали, що найбільша інтенсивність руху припадає на кінець тижня, у напрямку Києва (підхід №2) і становить 1310 авто/год. Найменша інтенсивність, саме в пікові години, припадає на виїзд з Кільцевої дороги (підхід №3) і становить 788 авто/год. Загалом, у головному напрямку інтенсивність руху на підходах є значно вищою.

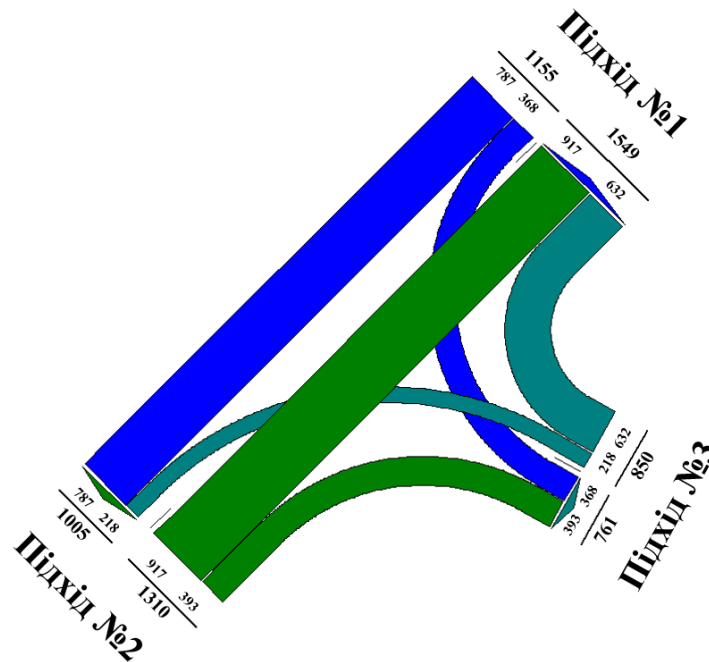


Рисунок 2 – Графічне зображення інтенсивності транспортного потоку в найбільш піковий період на перехресті

При русі автомобілів в напрямку Львова по вулиці Київській (підхід №1) спостерігається велика кількість лівоповоротних транспортних засобів. За результатами натурних досліджень встановлено, що найбільша їх кількість в п'ятницю у піковий період доби 368 авто/год.

Гістограма інтенсивності транспортного потоку (рис. 3) на підходах до перехрестя у різні дні, чітко демонструє, що в п'ятницю інтенсивність транспортного потоку була найвищою на всіх підходах до перехрестя.

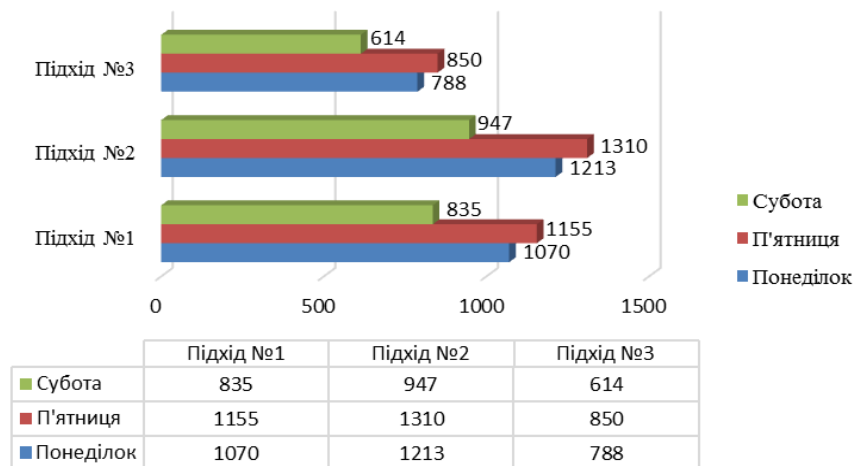


Рисунок 3 – Гістограма інтенсивності транспортного потоку на підходах до перехрестя

З урахуванням дня з найвищою інтенсивністю руху серед тих, у які проводилися натурні спостереження, було визначено відсоткове співвідношення прямоїдучих, правоповоротних і лівоповоротних транспортних засобів, а також склад транспортного потоку. Встановлено що частка вантажного транспорту вантажопідйомністю більше 6 тон є значною і складає 27% (рисунок 4).



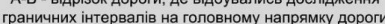
(а) та складом транспортного потоку (б)

проїзд зони перехрестя або здійснення поворотних маневрів.

створює небезпеку для інших учасників дорожнього руху, які рухаються через перехрестя.

(найменшою) для безпечного здійснення лівоповоротного маневру.

дороги А-Б (рис.5).



нерегульованого перехрестя Кільцева дорога - вул. Київська (Н17)

періодів натурних досліджень, отримано графічні залежності зміни тривалості граничного часового

інтервалу залежно інтенсивності руху на головній дорозі перехрестя з урахуванням частки лівоповоротних ТЗ (рис.6). За результатами дослідження параметрів транспортного потоку на нерегульованому перехресті, встановлено динаміку зміни граничного часового інтервалу на головній дорозі від частки лівоповоротних потоків, яка становила 10-30%.

Час очікування на перехресті для здійснення лівого повороту на нерегульованому перехресті - це проміжок часу, протягом якого водій, який має намір здійснити маневр, однак змушений очікувати на часовий інтервал в потоці зустрічного транспорту для завершення маневру без порушення правил дорожнього руху та не створюючи небезпечних ситуацій для інших учасників руху. Зміна граничного інтервалу на головній дорозі (рис. 6) демонструє, як змінюється час очікування для здійснення маневру лівого повороту за коливання інтенсивності руху на головному напрямку та різної частки лівоповоротних транспортних засобів становить (10%-30%).

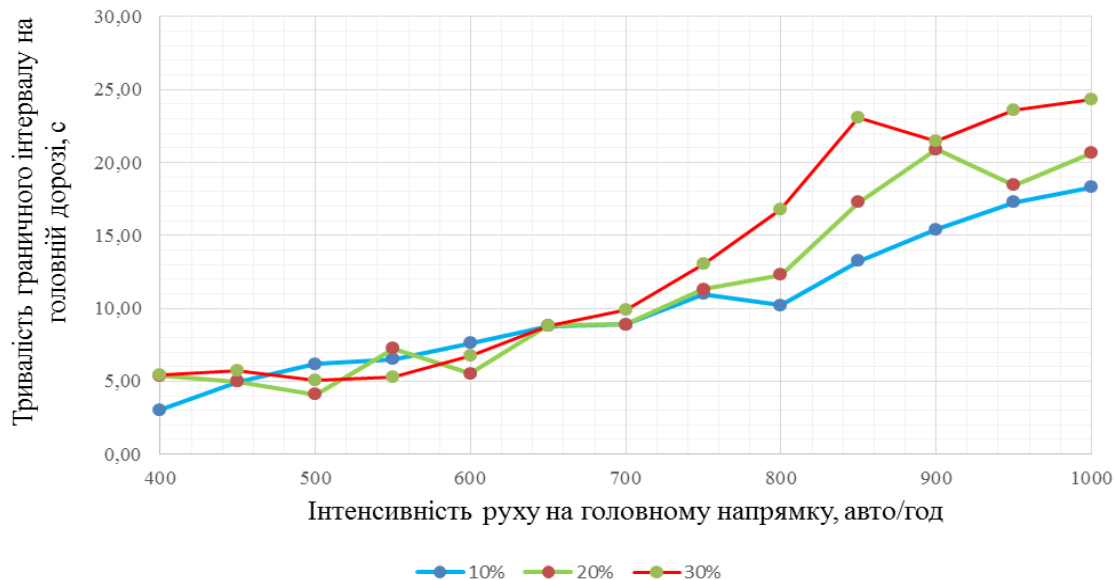


Рисунок 6 – Зміна тривалості граничного часового інтервалу залежно інтенсивності руху на головній дорозі нерегульованого перехрестя

За незначної інтенсивності руху (до 700 авто/год) на головній дорозі нерегульованого перехрестя, граничний часовий інтервал у ТП є незначним і коливається від 5 до 10 с незалежно від частки лівоповоротного потоку. Це пояснюється великими розривами у транспортному потоці та можливістю поворотним потокам здійснити маневр за низьких значень інтенсивності руху зустрічних прямоїдучих потоків. Найбільші граничні часові інтервали доводиться очікувати лівоповоротним транспортним засобам за інтенсивності зустрічного руху на підході до перехрестя більше 900 авто/год та частки лівоповоротних ТЗ – понад 20%.

Наведений графік на рис. 6 вказує, що прослідковується чітка залежність між тривалістю граничного часового інтервалу на головній дорозі та інтенсивністю руху зустрічного транспортного потоку. Отримана залежність характеризує утворення значних часових інтервалів на головній дорозі та змушують довго очікувати безпечного здійснення поворотного маневру за інтенсивності зустрічного руху більше 800 авто/год. та частки лівоповоротних потоків більше 20 %.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Результати дослідження параметрів транспортного потоку на нерегульованому перехресті вул. Київська – Кільцева дорога поблизу населеного пункту Гамаліївка демонструють чітку залежність інтенсивності руху від доби і дня тижня, що має важливе значення для планування оптимізації роботи перехрестя та вдосконалення організації дорожнього руху.

На практиці аналіз граничних часових інтервалів у транспортному потоці у зоні нерегульованих перехресть в умовах насиченого руху за допомогою експериментальних досліджень дозволить оцінити безпеку дорожнього руху та ефективність його роботи за різних параметрів транспортного потоку.

Результати досліджень мають стати основою для оптимізації схем організації руху на нерегульованих перехрестях. При визначенні пріоритетних напрямків руху на головній дорозі важливо аналізувати закономірності розподілу часових інтервалів між транспортними засобами.

Ігнорування можливості перевищення граничних значень часових інтервалів у ТП може призвести до підвищення ризику виникнення небезпечних ситуацій у зоні перехрестя.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень було визначено, що піковий період з найбільшою інтенсивністю руху спостерігається у вечірні години пік. Значна інтенсивність руху на нерегульованому перехресті в поєднанні з великою часткою вантажного транспорту створює незначні часові інтервали для проїзду перехрестя транспортними засобами, які здійснюють лівий поворот. Це призводить до утворення довгих черг транспортних засобів, що мають намір виконати лівоповоротний маневр. Епюра інтенсивності руху в головному напрямку щодо граничного часу на головній дорозі показує, що при інтенсивності понад 700 авто/год граничний часовий інтервал на проїзд перехрестя перевищує 20 секунд.

Натурні дослідження зафіксували пікову інтенсивність прямоїдучих ТЗ в головному напрямку на рівні 917 авто/год, що створює небезпечні ситуації на перехресті, які часто призводять до дорожньо-транспортних пригод.

Результати досліджень граничних часових інтервалів у транспортному потоці рекомендовано використовувати під час вдосконалення схем організації дорожнього руху на нерегульованих перехрестях. Під час організації дозволених напрямків руху зі смуг руху, необхідно враховувати закономірності зміни граничних часових інтервалів на головній дорозі перехрестя, оскільки за певних обставин вони можуть бути значними, перевищувати критичні значення, що буде підвищувати небезпеку всього перехрестя.

Отримані результати вказують на те, що при вдосконаленні схеми руху на нерегульованих перехрестях необхідно враховувати не тільки інтенсивність руху самого транспортного потоку, але й частку транспортних засобів, які виконують різні маневри з головної дороги.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сотнікова А. О. Особливості формування транспортних потоків в умовах війни : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії : 275 – транспортні технології (за видами) / Анна Олександрівна Сотнікова ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2024. – 194 с.
2. Žiliūtė L., Laurinavičius A., & Vaitkus, A. (2010). Investigation into traffic flows on high intensity streets of Vilnius city. *Transport*, 25(3), 244-251.
3. Єрмак О.М. Дослідження впливу інтенсивності руху транспортного потоку на безпеку перетинання перехрестя // *Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб. Вип.103.* – Харків: ХНАМГ, 2012. – С. 351-355
4. Євчук, М. Ю. Дослідження граничних часових інтервалів на нерегульованих перехрестях / М. Ю. Євчук, О. М. Грицунь // *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології : зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, ХНАДУ.* - Харків, 2013. - Вип. 4. – С. 45-47.
5. Bojkiv M., Postransky T., Afonin M. Establishing patterns of change in the efficiency of regulated intersection operation considering the permitted movement directions // *Східно-Європейський журнал передових технологій.* – 2022. – Vol. 4/3 (118). – С. 17–26. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262250>
6. Fornalchyk, Y., Kemytsky, I., Hrytsun, O., & Royko, Y. (2021). Choice of the rational regimes of traffic light control for traffic and pedestrian flows. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*, 30(1), 38–50. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2021.30.1.4>
7. Babu, S.S., and Vedagiri, P. (2017). Traffic Conflict Analysis of Unsignalised Intersections under Mixed Traffic Conditions: *European Transport\Trasprti Europei*, No. 66, pp. 1–12.
8. Goyani, J., Pawar, N., Gore, N., Jain, M., & Arkatkar, S. (2019). Investigation of traffic conflicts at unsignalized intersection for reckoning crash probability under mixed traffic conditions. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 13, 2091-2110.
9. Bonela, S. R., & Kadali, B. R. (2022). Review of traffic safety evaluation at T-intersections using surrogate safety measures in developing countries context. *IATSS research*, 46(3), 307-321.
10. Абрамова Л. С. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху / Л. С. Абрамова, С. В. Капінус // *Комунальне господарство міст. Серія : Технічні науки та архітектура.* - 2018. - Вип. 140. - С. 91-97.

REFERENCES

1. Sotnikova A. O. Peculiarities of the formation of transport flows in wartime: dissertation for the degree of Doctor of Philosophy: 275 – transport technologies (by type) / Anna Oleksandrivna Sotnikova; Ministry of Education and Science of Ukraine, National University "Lviv Polytechnic". – Lviv, 2024. – 194 p. (in Ukrainian).

2. Žiliūte L., Laurinavičius A., & Vaitkus, A. (2010). Investigation into traffic flows on high intensity streets of Vilnius city. *Transport*, 25(3), 244-251 (in English).
3. Yermak O.M. Doslidzhennia vplyvu intensyvnosti rukhu transportnoho potoku na nebezpeku peretynannia perekhrestia // *Komunalne hospodarstvo mist: Nauk.-tekhn. zb. Vyp.103.* – Kharkiv: KhNAMh, 2012. – S. 351-355. (in Ukrainian).
4. Yevchuk, M. Yu. Doslidzhennia hranychnykh chasovykh intervaliv na nerekhulovanykh perekhrestiaakh / M. Yu. Yevchuk, O. M. Hrytsun // *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii : zb. nauk. pr. / M-vo osvity i nauky Ukrainy, KhNADU.* - Kharkiv, 2013. - Vyp. 4. – С. 45-47. (in Ukrainian).
5. Bojkiv M., Postransky T., Afonin M. Establishing patterns of change in the efficiency of regulated intersection operation considering the permitted movement directions // *Східно-Європейський журнал передових технологій.* – 2022. – Vol. 4/3 (118). – P. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262250> (in English).
6. Fornalchyk, Y., Kernyskyy, I., Hrytsun, O., & Royko, Y. (2021). Choice of the rational regimes of traffic light control for traffic and pedestrian flows. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*, 30(1), 38–50. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2021.30.1.4> (in English).
7. Babu, S.S., and Vedagiri, P. (2017). Traffic Conflict Analysis of Unsignalised Intersections under Mixed Traffic Conditions: *European Transport/Trasporti Europei*, No. 66, pp. 1–12. (in English).
8. Goyani, J., Pawar, N., Gore, N., Jain, M., & Arkatkar, S. (2019). Investigation of traffic conflicts at unsignalized intersection for reckoning crash probability under mixed traffic conditions. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 13, 2091-2110. (in English).
9. Bonela, S. R., & Kadali, B. R. (2022). Review of traffic safety evaluation at T-intersections using surrogate safety measures in developing countries context. *IATSS research*, 46(3), 307-321. (in English).
10. Abramova L. S. Vyznachennia balansu mizh parametramy dorozhnoho rukhu / L. S. Abramova, S. V. Kapinus // *Komunalne hospodarstvo mist. Seriya : Tekhnichni nauky ta arkhitektura.* - 2018. - Vyp. 140. - S. 91-97. (in Ukrainian).

Boikiv R.V. Analysis of limit time intervals at unsignalized intersection with high rate of left-turning vehicles.

The paper analyzes the main characteristics of traffic flow in the area of an unsignalized intersection and their influence on the formation of limit time intervals in the main direction, considering the share of left-turning vehicles. The intersection has a significant traffic volume on all approaches, as the national road H17 and the international highway M06 pass through it. The intersection is characterized by all permitted maneuvers, a high percentage of freight vehicles, and turning vehicles from the main road.

The study of traffic conditions and traffic flow parameters at the intersection found that the traffic volume on the main road at different times of the day is more than 1000 veh/h, and the share of left-turning vehicles ranges from 10 to 30%. Based on this, the duration of the limit time intervals in the traffic flow is determined in the main direction of the unsignalized intersection. It was found that after the increase in the volume of the direct traffic flow on the main road of the unsignalized intersection exceeds 700 veh/h, the maximum time interval begins to increase by more than 10 s. It has been found that with an increase in the share of left-turning vehicles from the main road, the duration of the limit time intervals at an unsignalized intersection in the traffic flow varies between 20-25 s. The analysis of time limits on the main road shows that safe traffic modes at an unsignalized intersection are affected by the distribution of traffic volumes by direction, traffic flow heterogeneity, and the share of left-turning vehicles.

The results of the research should be considered when improving existing traffic management schemes at unsignalized intersections. When determining the permitted directions of movement from the main road, it is necessary to take into account the patterns of change in intervals in the traffic flow, since under certain circumstances they may exceed critical values and create potential traffic hazards in the intersection area. Keywords: traffic flow, unregulated intersection, traffic intensity, lane, left-hand vehicles, limit interval of movement.

Keywords: traffic flow, unsignalized intersection, traffic volume, traffic lane, left-turning vehicles, limit time interval.

БОЙКІВ Роман Васильович, асистент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: roman.v.boikiv@lpnu.ua. <https://orcid.org/0009-0001-4824-208X>

Roman BOIKIV, Assistant of the Department of Transport Technologies Lviv Polytechnic National University e-mail: roman.v.boikiv@lpnu.ua. <https://orcid.org/0009-0001-4824-208X>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1715

Бохонко А. В.

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна***АНАЛІЗ ПРОХІДНОСТІ АВТОМОБІЛЯ З АЕРОКОМПЕНСАТОРОМ**

Прохідністю повинні володіти автомобілі всіх типів, оскільки для будь-якого автомобіля може виникнути необхідність з'їзду з впорядкованої дороги, проїзду ділянок доріг, що знаходяться в несправному стані, рух по ґрунтових об'їздах ремонтваних або будованих ділянках доріг і мостів, рух в зимовий час по нерівних, засніжених дорогах.

Для автомобілів, які систематично працюють в важких дорожніх умовах, прохідність має першорядне значення. До них в першу чергу відносяться військові вантажні автомобілі середньої і малої вантажопідйомності, невеликі автобуси, легкові автомобілі і інші, що використовуються в сільській місцевості або лісових районах, а також автомобілі-самоскиди, що використовуються на будівництвах великих гідротехнічних споруд, на дорожньому і інших будівництвах. Від прохідності цих автомобілів у великій мірі залежать середні швидкості руху, їх продуктивність і збереження механізмів.

В статті проаналізовано залежності опору кочення колеса від основних параметрів колеса і ґрунта. Побудовано графічні залежності глибини колії, сили і коефіцієнта опору рухові від величини ущільнення і його вологості для м'яких ґрунтів. Проведено класифікацію перешкод і аналіз прохідності автомобілів з врахуванням їх профільних властивостей. Визначено основні оціночні показники прохідності. На основі аналізу чинників, що покращують прохідність встановлено, що прохідність автомобілів в умовах бездоріжжя можна покращити, зменшивши вертикальне навантаження на опорну поверхню. Реалізувати це можна поєднавши колісний рушій і аерокомпенсатор (повітряний вентилятор направленої дії). На основі проведених попередніх розрахунків встановлено, що різниця між навантаженням коліс автомобіля без аерокомпенсатора і з його використанням складає 10-15%.

Ключові слова: прохідність автомобіля, опір кочення колеса, вертикальне навантаження автомобіля, аерокомпенсатор вертикального навантаження колеса, класифікація перешкод.

ВСТУП

Прохідністю автомобіля називається його пристосованість до здійснення перевезень в скрутних дорожніх умовах по дорогах, що не мають твердого покриття або що є важко прохідними, а також без доріг.

Прохідністю повинні володіти автомобілі всіх типів, оскільки для будь-якого автомобіля може виникнути необхідність з'їзду з впорядкованої дороги, проїзду ділянок доріг, що знаходяться в несправному стані, рух по ґрунтових об'їздах ремонтваних або будованих ділянках доріг і мостів, рух в зимовий час по нерівних, засніжених дорогах.

Проте ступінь прохідності потрібна різна для автомобілів різних типів залежно від дорожніх умов, для роботи в яких вони призначені. Наприклад, маршрутні автобуси великої місткості, легкові автомобілі вищого класу і інші типи автомобілів, що призначаються для використання в великих містах або на автомобільних магістралях, працюють майже виключно в добрих дорожніх умовах. Тому вимоги до їх прохідності можуть бути мінімальними.

Для автомобілів, які систематично працюють в скрутних дорожніх умовах, прохідність має першорядне значення [1]. До них в першу чергу відносяться військові вантажні автомобілі середньої і малої вантажопідйомності, невеликі автобуси, легкові автомобілі і інші, що використовуються в сільській місцевості або лісових районах, а також автомобілі-самоскиди, що використовуються на будівництвах великих гідротехнічних споруд, на дорожньому і інших будівництвах. Від прохідності цих автомобілів у великій мірі залежать середні швидкості руху, їх продуктивність і збереження механізмів.

Деякі різновиди автомобільних перевезень неминуче повинні здійснюватися по бездоріжжю або в особливо важких дорожніх умовах. До таких перевезень відносяться, наприклад, вивіз з полів урожаю картоплі, буряка і інших культур в осінньо-зимовий період, вивіз на поля добрив, обслуговування геологорозвідувальних робіт, прокладка газопроводів і ліній електропередач і інші перевезення. Для автомобілів, що використовуються в таких випадках прохідність є основною експлуатаційною якістю.

Оцінити прохідність можна використовуючи констуктивні, профільні характеристики автомобіля та доріг, по яких він призначений рухатися. Основним критерієм визначення його прохідності повинна служити можливість ним подолання різноманітних перешкод [2]. За вихідні

парметри для розрахунків бралися парметри військових автомобілів оскільки прохідність для них – одна з найважливіших властивостей.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є аналіз залежності опору кочення колеса від основних параметрів колеса і ґрунта, побудова графічних залежностей глибини колії, сили і коефіцієнта опору рухові від величини ущільнення і його вологості для м'яких ґрунтів. Провести класифікацію перешкод і аналіз прохідності автомобілів з врахуванням їх профільних властивостей і визначити основні оціночні показники прохідності. Запропонувати спосіб покращення прохідності автомобіля і обґрунтувати його ефективність.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Опрацювання експериментальних даних дає можливість установити залежність опору кочення колеса від основних параметрів колеса і ґрунта. Прикладом такої залежності для визначення P_f може слугувати формула А. Е. Омелянова [3]:

$$P_f = C_1 \sqrt[3]{\frac{G_k^4}{p_0 D^2}} + C_2 G_k \sqrt[3]{\frac{p_0}{CD}}, \quad (1)$$

де C_1 і C_2 – досвідчені коефіцієнти, що залежать від конструкції і матеріалу шини; середні значення їх: $C_1 = 0,065$; $C_2 = 0,425$;

G_k – навантаження на колесо, 10 Н;

p_0 – тиск повітря в шинах, 10^5 Па;

D – зовнішній діаметр колеса, 10^{-3} м;

C – коефіцієнт несучої спроможності ґрунту.

Перший доданок у цій формулі являє собою опір коченню в результаті деформації колеса, а другий – у результаті деформації ґрунту під колесом що деформується. На щільних ґрунтах другий доданок значно менше першого, і ним можна зневажити. На м'яких ґрунтах при високому тиску повітря в шинах основну роль буде відігравати другий доданок.

При коченні колеса по твердому ґрунті розмір може складати:

- для шин високого тиску ($p_0 = 0,35 \div 0,55$ МПа) - $(1,20 \div 1,45) p_0$;

- для шин низького тиску ($p_0 = 0,15 \div 0,2$ МПа) - $(1,10 \div 1,25) p_0$;

- для шин із наднизького тиску ($p_0 = 0,05 \div 0,2$ МПа) - $(1,05 \div 1,10) p_0$.

Рух по нещільних зв'язкових ґрунтах (ґрунтова цілина, оранка) супроводжується утворенням колії. Виходячи зі степеневі залежності [4] між навантаженням на ґрунт і його деформацію для жорсткого колеса глибина колії може бути визначена по формулі

$$h = \sqrt[\mu+1]{\frac{G_k}{Cb \left(1 - \frac{\mu}{3}\right) \sqrt{D}}} \quad (2)$$

де: h – глибина колії;

G – навантаження на колесо;

C і μ – коефіцієнти, що характеризують ґрунт;

b – ширина колеса;

D – діаметр колеса.

Сила опору кочення для цих же умов визначається по формулі [5]

$$P_f = Cb \frac{h^{\mu+1}}{\mu+1}. \quad (3)$$

Тоді коефіцієнт опору коченню жорсткого колеса по ґрунту, що деформується

$$f = \frac{P_f}{G_k} = \frac{1}{(\mu + 1)(1 - \frac{\mu}{3})} \sqrt{\frac{h}{D}} \quad (4)$$

Можливість подолання м'яких ґрунтів визначається не тільки розміром опору коченню, але і зчепленням головних коліс із ґрунтом, достатнім для подолання цього опору.

При коченні колеса, навантаженого вертикальною силою G_k і тангенціальною силою T_k по деформуючому ґрунті, відбувається вдавнення шини в ґрунт і зрушення ґрунту по площинах, обумовлених відстанями ab між сусідніми виступами протектора шини (рисунок 1) і довжиною виступу bd . Опір ґрунту зрушення відповідно до формули (5) у даному випадку буде дорівнювати [6]

$$T = cF + fBQ^* \quad (5)$$

де F – сумарна площа зрушення ґрунту під колесом.

Q^* – вертикальне навантаження.

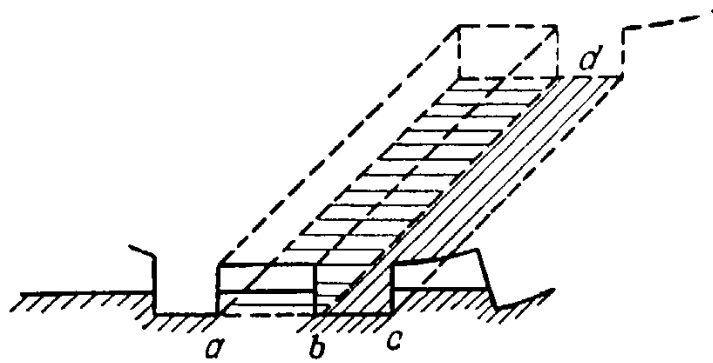


Рисунок 1 – Зачеплення протектора колеса з ґрунтом.

При коченні пневматичного колеса по м'якому ґрунті утворення колії носить більш складний характер, тому що колесо в цьому випадку теж деформується. У результаті деформації пневматичної шини контакт колеса з ґрунтом відбувається по поверхні, що описується в площині колеса радіусом більшим, ніж радіус недеформованного колеса. На цій підставі запропоновано розглядати кочення пневматичного колеса по ґрунту як кочення жорсткого колеса, але декілька більшого діаметра (рис. 4.11). Діаметр D_1 жорсткого колеса, що утворить таку ж колію h , як і пневматичне колесо діаметром D , можна визначити приблизно по формулі [7]

$$D_1 = D(1 + \frac{i}{h}), \quad (6)$$

Тоді коефіцієнт опору ґрунту кочення $f_{ПН}$ пневматичного колеса буде дорівнювати

$$f_{ПН} = \frac{h_{жс} - i}{h_{жс}(\mu + 1)(1 - \frac{\mu}{3})} \sqrt{\frac{h_{жс}}{D}} \quad (7)$$

де $h_{жс}$ – глибина колії, що утворилася б при проході жорсткого колеса діаметром D ;

i – радіальна деформація шини.

Перший множник у цій формулі являє собою опір коченню в результаті деформації колеса, а другий – у результаті деформації ґрунту під колесом що деформується. На щільних ґрунтах другий доданок значно менше першого, і ним можна зневажити. На м'яких ґрунтах при високому тиску повітря в шинах основну роль буде відігравати другий доданок.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Прохідність є одним із основних експлуатаційно-технічних якостей автомобіля, що визначає можливість ефективного використання автомобіля у важких дорожніх умовах. Цією якістю повинні володіти автомобілі всіх типів, але у залежності від їхнього призначення - у різному ступені. У зв'язку з цим, саме поняття прохідності для автомобілів кожного типу має своє специфічне значення. Так, наприклад, прохідність народногосподарських автомобілів зв'язують із продуктивністю їх і вартістю одиниці транспортної роботи у важких дорожніх умовах. Для військових автомобілів прохідність набуває особливо важливе значення, тому що від цієї якості бойових і транспортних автомобілів багато в чому залежить успіх забезпечення бойових дій військ у сучасній війні.

Під прохідністю військового автомобіля варто розуміти спроможність його рухатися по поганих дорогах і поза дорогами, долаючи на шляху природні і штучні перешкоди без допоміжних засобів. У залежності від призначення військові автомобілі мають різну прохідність. За цією ознакою вони діляться на автомобілі звичайної, підвищеної і високої прохідності.

Автомобілі звичайної прохідності призначаються для руху по шосейних і ґрунтових дорогах. До них відносяться народногосподарські автомобілі загальнотранспортного призначення з колісною формулою 4X2, із звичайними тороїдними шинами, із диференціалом, що не блокується.

До автомобілів підвищеної прохідності відносяться військові автомобілі з колісною формулою 4X4, 6X4, 6X6 і т.д., із широкопрофільними шинами, із шинами регульованого тиску повітря, із частково або повністю блокуючими диференціалами. Ці автомобілі призначені для роботи і на дорогах, і на місцевості поза дорогами.

Автомобілями високої прохідності є повнопривідні автомобілі із шинами низького тиску, із аромними шинами або пневмокотками. Ці автомобілі можуть мати спеціальне компонування, доповнюючі пристрої, що підвищують прохідність (наприклад, додаткові ковзанки для подолання ровів).

Автомобілі високої прохідності можуть бути плаваючими, працювати в особливо важких умовах.

Перешкоди, які здатні викликати втрату прохідності, можуть бути дуже різними, і кожна з перешкод по-своєму впливає на автомобіль. У залежності від цього всі перешкоди можна розбити на три групи (рисунк 2):

- перешкоди, що створюють великий опір руху і вимагають на подолання їх силу тяги, яка близька до сили тяги по зчепленню; до них відносяться розбиті дороги, м'які ґрунти (болото, сипучі піски, пухкий сніг), круті підйоми, граничні перешкоди, броди;
- перешкоди, здатні викликати перекидання автомобіля: рови, косогори, круті спуски, слизькі дороги;
- перешкоди, здатні викликати затоплення автомобіля; до них відносяться водяні перешкоди (відкриті і замерзлі), багнисте болото.

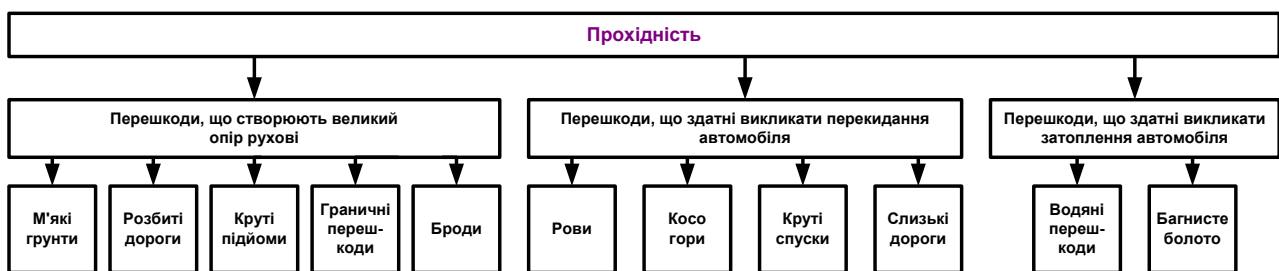


Рисунок 2 – Класифікація перешкод

Перешкоди, які здатні викликати втрату прохідності, дуже різноманітні, і кожна з них має свою характеристику (коефіцієнт опору коченню, кут підйому, ширину, висоту і т.п.).

Прохідність автомобіля оцінюється сукупністю всіх параметрів. У ряді випадків прохідність автомобіля може бути оцінена лише у порівнянні відносно інших машин, що працюють у рівних дорожньо-кліматичних умовах.

Прохідність автомобіля оцінюється за ряд поодиноких параметрів і за узагальненими параметрами (рисунк 3). До параметрів, що визначають можливості автомобіля долати перешкоди того чи іншого виду, відносяться: коефіцієнт вільної тяги K_t ; максимальний кут підйому; максимальна висота порога H_1 ; максимальна ширина рову l_p , максимальна глибина сніжного покриву H ; максимальна глибина броду K_d .

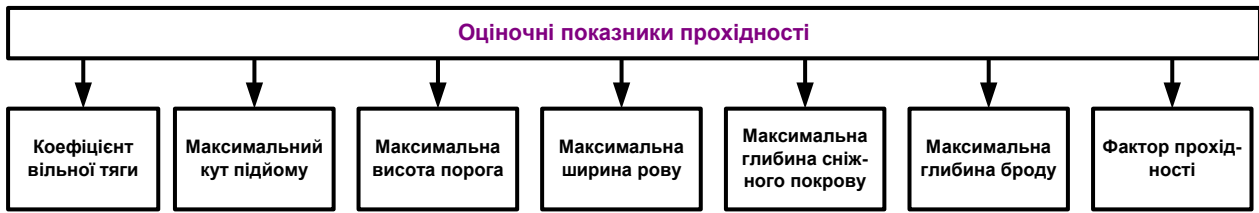


Рисунок 3 – Оціночні показники прохідності

Коефіцієнт вільної тяги K_t являє собою відношення максимальної сили тяги, яка може бути використана на гаку в даних дорожніх умовах до початку буксування чи заглохання двигуна, до повної ваги автомобіля [8]:

$$K_t = P_{kr} / G \quad (8)$$

Так, як за зчепленням: $P_{kr} = P_{\phi} - \psi G = \phi G_{\phi} - \psi G$, а відношення $G_{\phi} / G = K_{\phi}$ – коефіцієнт загальної ваги, то коефіцієнт вільної тяги за зчепленням можна визначити за формулою: $K_t = \phi K_{\phi} - \psi$.

Коефіцієнт вільної тяги за двигуном знайдемо з виразу (8) якщо візьмемо $P_{kr} = P_d - G$.

Тоді $K_{td} = \phi_d - \psi$,

де $\phi_d = P_d / G$ – питома сила тяги за двигуном.

Коефіцієнт вільної тяги K_t оцінює в основному прохідність автомобілів через перешкоди, потребуючи для їх подолання підвищеної сили тяги. Він залежить як від конструктивних параметрів автомобіля K_{ϕ} та ϕ_d так і від дорожніх умов (ϕ , $\psi = f \cos \alpha + \sin \alpha$), у яких він рухається.

Всі перераховані параметри, взяті разом, достатньо повно оцінюють прохідність автомобіля з точки зору можливості руху. Але вони не дозволяють оцінити прохідність автомобіля з врахуванням ефективності його використання у складних умовах руху. Для цієї мети запропоновані узагальнені параметри прохідності, які виявляються у результаті порівняльних випробовувань на важкопрохідному маршруті (включаючи типові перешкоди) та на шосе.

До узагальнюючих параметрів відносяться, наприклад, фактор прохідності Π , який визначається за формулою [9]:

$$\Pi = \frac{G_m L_m}{t_m g_m} \div \frac{G_{sh} L_{sh}}{t_{sh} g_{sh}} \quad (9)$$

де: G_g – корисне навантаження;

L – довжина випробувальної ділянки;

t – час руху;

g – витрата палива.

Індекс «м» відноситься до важкопрохідного маршруту, індекс «ш» до шосе.

Фактор прохідності Π показує, на скільки понижується середня швидкість, корисне навантаження та економічність автомобіля при переході з шосе на важкопрохідний маршрут. Це дає змогу оцінити прохідність народногосподарських автомобілей. Для військових автомобілей ця оцінка неприйнятна. Якщо військовий автомобіль перевозить вантаж штатної ваги чи буксирує причіп, то він мусить виконати цю задачу, рухаючись по шосе і по важкопрохідному маршруту. В цих умовах кращу прохідність буде мати той автомобіль, який виконає задачу швидше.

Звичайно, що автомобілі, які порівнюються, повинні випробовуватись на одному і тому ж маршруті при інших рівних умовах (технічний стан, погода, класифікація водіїв тощо).

На параметри оцінки прохідності, по яких порівнюють різні автомобілі і які записуються у техніко-технічну характеристику автомобіля, впливають різні фактори, які характеризують як автомобіль (рисунок 4), так і ґрунт: тягово-динамічні; геометричні; конструктивні.

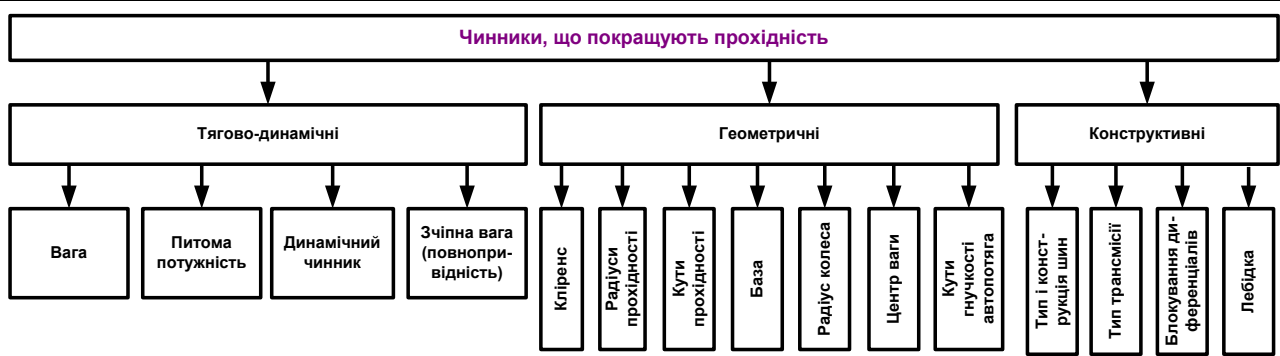
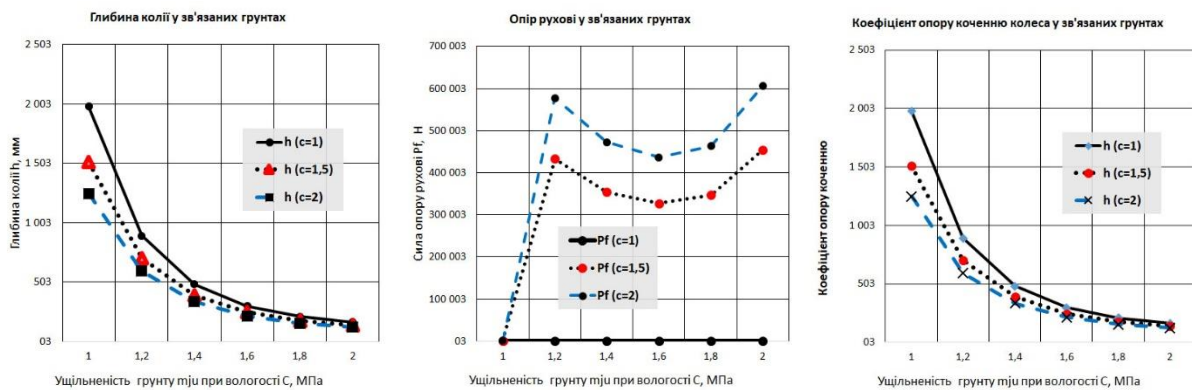


Рисунок 4 – Чинники, що покращують прохідність

На рисунку 5 можна побачити залежності глибини колії, сили і коефіцієнта опору рухові від величини ущільнення і його вологості для м'яких ґрунтів розраховані за формулами (2), (3), (7).



а) б) в)

Рисунок 5 – Залежності глибини колії, сили і коефіцієнта опору рухові від величини ущільнення і його вологості для м'яких ґрунтів

Пропонується частково зменшувати вертикальне навантаження автомобіля. Такий підхід дозволить підвищити прохідність транспортного засобу, забезпечивши при цьому його енергоощадливі характеристики та економічну доцільність і створити автомобіль з економічно ефективним життєвим циклом особливо в перебігу експлуатації, тобто зробити машину для щоденного використання в широкому діапазоні застосування (рисунки 6). Реалізувати це можна поєднавши колісний рушій і аерокомпенсатор (повітряний вентилятор направленої дії).

Якщо м'який перезволожений ґрунт покритий шаром більш міцного ґрунту, то можливість подолання такого ґрунту буде визначатися в основному тривкістю верхнього шару. Це відноситься в першу чергу до заболочених ділянок місцевості і болотам. Подолання заболочених ділянок визначається щільністю поверхневого торф'яного шару. Прохідність таких ділянок підвищується зниженням тиску повітря в шинах. Підтвердженням цьому може служити такий приклад [4]: число проходів автомобіля КрАЗ-5322 по одному сліду на заболоченій місцевості при зниженні тиску з 0,3 до 0,08 МПа збільшувалося в два-три рази. Припустимий тиск для подолання боліт із різною щільністю торфу приведено в таблиці.

Таблиця. Несуча здатність торфу

Стан ґрунту	Допустимий тиск, МПа
Дуже ущільнений (слабо зволожений)	0,10
Ущільнений (середньозволожений)	0,075
Рихлий (зволожений)	0,055
Дуже рихлий (сильно зволожений)	0,025
Текучий (рідкий)	0,012

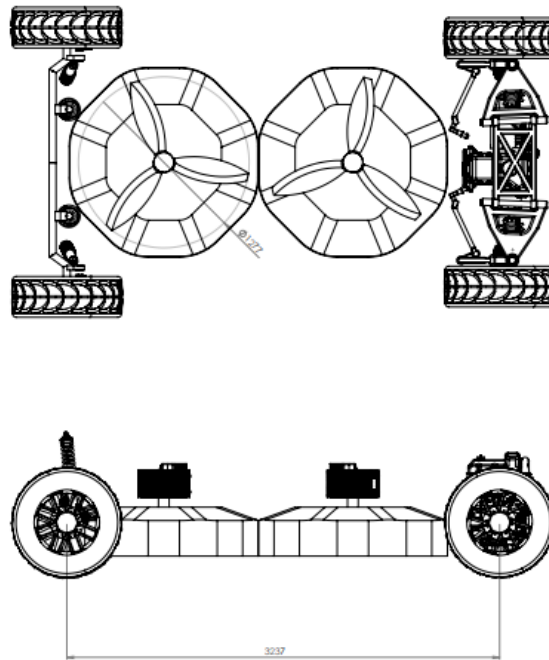


Рисунок 6 – Компонування основних елементів автомобіля з аерокомпенсатором

На рисунку 7 можна побачити зменшення навантаження на ґрунт при використанні і аерокомпенсатора. Попередні дослідження показали, що різниця між навантаженням коліс автомобіля без аерокомпенсатора і з його використанням складає 10-15%.

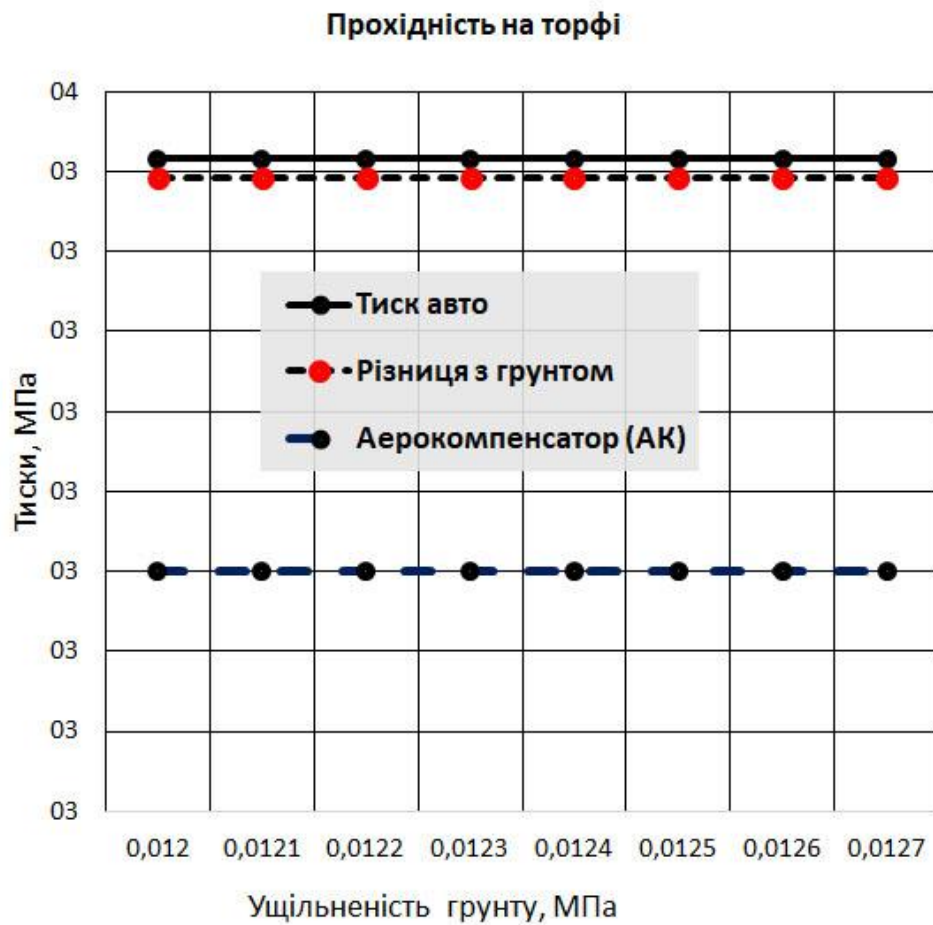


Рисунок 7 – Прохідність автомобля з аерокомпенсатором на торфі

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

При русі автомобіля по м'якому ґрунті в результаті взаємодії пневматичних коліс із ґрунтом, що деформується утвориться колія, унаслідок чого збільшується опір кочення. Тому що м'який ґрунт має низькі зчіпні якості, то необхідна для руху сила тяги може досягти граничного значення по зчепленню. Буксування головних коліс, що почалося в цьому випадку, приведе до інтенсивного збільшення колії, росту лобового опору коліс і втраті прохідності.

Утворення колії і зчеплення коліс із ґрунтом залежать не тільки від параметрів автомобіля, але і від властивостей ґрунту. Колія утвориться в результаті ущільнення ґрунту і зрушення ґрунту в сторони, а розмір цих деформацій, їхній характер (пружна або пластична) визначаються гранулометричним складом ґрунту (розміром його твердих часток), його щільністю, вологістю, глибиною залягання і т.п.

Опір кочення і зчеплення коліс із ґрунтом залежать від площі контакту шини з опорною поверхнею дороги (залежить зокрема від вертикального навантаження), питомого тиску в зоні контакту, радіальної і тангенціальної деформації шини, зчіпних якостей протектора і т.д. Всі ці параметри в кінцевому рахунку визначаються такими конструктивними характеристиками шин, як розміри і форма поперечного перетину шини, конфігурація і розміри малюнка протектора.

Автомобілі з частковим розвантаженням ваги за допомогою повітряної подушки (аерокомпенсатора) використовують технології, які дозволяють зменшити навантаження на колеса і, відповідно, покращити характеристики транспортного засобу. Такі автомобілі є альтернативним варіантом підвищення прохідності транспортних засобів в умовах бездоріжжя. Основні переваги автомобілів з аерокомпенсатором: зменшення навантаження на підвіску, покращення комфорту під час їзди, підвищення стабільності, покращена керованість, зниження витрат на паливо, зменшення зносу шин, гнучкість у перевезенні вантажів, збільшення корисного навантаження, покращення безпеки, зменшення негативного екологічного впливу.

ВИСНОВКИ

Для автомобілів, які систематично працюють в важких дорожніх умовах, прохідність має першорядне значення. До них в першу чергу відносяться військові вантажні автомобілі середньої і малої вантажопідйомності, невеликі автобуси, легкові автомобілі і інші, що використовуються в сільській місцевості або лісових районах, а також автомобілі-самоскиди, що використовуються на будівництвах великих гідротехнічних споруд, на дорожньому і інших будівництвах. Від прохідності цих автомобілів у великій мірі залежать середні швидкості руху, їх продуктивність і збереження механізмів.

В статті проаналізовано залежності опору кочення колеса від основних параметрів колеса і ґрунту. Побудовано графічні залежності глибини колії, сили і коефіцієнта опору рухові від величини ущільнення і його вологості для м'яких ґрунтів. Проведено класифікацію перешкод і аналіз прохідності автомобілів з врахуванням їх профільних властивостей. Визначено основні оціночні показники прохідності. На основі аналізу чинників, що покращують прохідність встановлено, що прохідність автомобілів в умовах бездоріжжя можна покращити, зменшивши вертикальне навантаження на опорну поверхню. Реалізувати це можна поєднавши колісний рушій і аерокомпенсатор (повітряний вентилятор направленої дії). На основі проведених попередніх розрахунків встановлено, що різниця між навантаженням коліс автомобіля без аерокомпенсатора і з його використанням складає 10-15%.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лиман К., Духняк Х., Гладков В., & Хіжнюк О. (2024). Перспективи розвитку машин спеціального призначення високої прохідності та організація військових перевезень. *Матеріали конференцій МНЛ*, (25 жовтня 2024 р., м. Полтава), 607–609. URL: <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/article/view/1302>
2. Подригало М., Нікорчук А. (2025). Підвищення прохідності автомобілів та наземних роботизованих комплексів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 23(1), с. 70-77. doi: 10.37701/dndivsovt.23.2025.09
3. Zhdanovich Cheslav, Orda Aleksandr, Kamiński Jan, Kuboń Maciej. Theoretical research of resistance motion of running systems. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2017, Vol. 62(1), Pp.182 – 186

4. Грубель М.Г., Крайник Л.В. Прогідність військових автомобілів: *монографія*. Київ: ВД «Професіонал», 2023. 183 с
5. Волков В. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля: *навч. посібник*. Харків: ХНАДУ, 2003. 292 с.
6. Складаров М. В., Шаповалов О. І. Математичне моделювання руху по деформованій опорній поверхні при зміні тиску в шинах коліс багатоцільового броньованого автомобіля на прикладі КрАЗ «Ураган». *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків: НА НГУ, 2021. Вип. 1 (37). С. 78–88.
7. Larminie J. C. Modifications to the mean maximum pressure system. *Journal of Terramechanics*, 1992. 29(2). P. 239–255. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002248989290029J/>
8. Матейчик В.П. Дослідження впливу типу енергоустановки на показники автомобіля підвищеної прохідності в експлуатаційних умовах / В.П.Матейчик, В.В.Яновський, Д.В.Савенок // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Луганськ, 2009. – №11(141). – С. 22 – 25
9. Матейчик В.П. Особливості моделювання руху автомобіля підвищеної прохідності в експлуатаційних умовах / В.П.Матейчик, Д.В.Савенок // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – Луганськ, 2007. – №6(112). – С. 27 – 33.

REFERENCES

1. Lyman K., Dukhniak Kh., Hladkov V., & Khizhniuk O. (2024). Perspektyvy rozvytku mashyn spetsialnoho pryznachennia vysokoi prokhidnosti ta orhanizatsiia viiskovykh perevezen. *Materialy konferentsii MNL*, (25 zhovtnia 2024 r., m. Poltava), 607–609. Vylucheno z <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/article/view/1302>
2. Podryhalo M., Nikorchuk A. (2025). Pidvyshchennia prokhidnosti avtomobiliv ta nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i seryfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*, 23(1), s. 70–77. doi: 10.37701/dndivsovt.23.2025.09
3. Zhdanovich Cheslav, Orda Aleksandr, Kamiński Jan, Kuboń Maciej. Theoretical research of resistance motion of running systems. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2017, Vol. 62(1), pp. 182–186.
4. Hrubel M.H., Krańnyk L.V. Prokhidnist viiskovykh avtomobiliv: *monohrafiia*. Kyiv: VD «Profesional», 2023. 183 s.
5. Volkov V.P. Teoriia ekspluatatsiinykh vlastyvostei avtomobilia: *navch. posibnyk*. Kharkiv: KhNADU, 2003. 292 s.
6. Skliarov M.V., Shapovalov O.I. Matematychnе modeliuвання rukhu po deformovanii opornii poverkhni pry zmini tysku v shynakh kolis bahatotsilovoho bronovanogo avtomobilia na prykladi KrAZ «Urahan». *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy*. Kharkiv: NA NHU, 2021. Vyp. 1 (37). S. 78–88.
7. Larminie J.C. Modifications to the mean maximum pressure system. *Journal of Terramechanics*, 1992. 29(2). P. 239–255. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002248989290029J/>
8. Mateichyk V.P. Doslidzhennia vplyvu typu enerhoustanovky na pokaznyky avtomobilia pidvyshchenoi prokhidnosti v ekspluatatsiinykh umovakh / V.P. Mateichyk, V.V. Yanovskyi, D.V. Savenok // *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. Luhansk, 2009. – №11(141). – S. 22–25.
9. Mateichyk V.P. Osoblyvosti modeliuвання rukhu avtomobilia pidvyshchenoi prokhidnosti v ekspluatatsiinykh umovakh / V.P. Mateichyk, D.V. Savenok // *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. – Luhansk, 2007. – №6(112). – S. 27–33.

A. Bokhonko. Analysis of the Off-Road Performance of a Vehicle Equipped with an Aero-Compensator

All types of vehicles must possess off-road capabilities, as any vehicle may encounter the need to leave a paved road, traverse damaged sections of roads, drive on dirt detours around repaired or constructed sections of roads and bridges, or travel in winter over uneven, snow-covered roads.

For vehicles that systematically operate under severe road conditions, off-road performance is of primary importance. These include, first and foremost, military medium- and light-duty trucks, small buses,

passenger cars, and other vehicles used in rural or forested areas, as well as dump trucks used in the construction of large hydraulic structures, road construction, and other construction projects. The average driving speeds, productivity, and preservation of vehicle mechanisms largely depend on the off-road capabilities of these vehicles.

This article analyzes the dependence of wheel rolling resistance on the main parameters of the wheel and the soil. Graphical dependencies are constructed showing the rut depth, resistance force, and rolling resistance coefficient as functions of soil compaction and moisture for soft soils. An obstacle classification and analysis of vehicle off-road performance considering their profile properties are carried out. Key performance indicators of off-road capability are identified. Based on an analysis of the factors that improve off-road performance, it is established that vehicle mobility on rough terrain can be enhanced by reducing the vertical load on the support surface. This can be achieved by combining a wheeled propulsion system with an aero-compensator (a directional air fan). Preliminary calculations show that the difference in wheel load between a vehicle without an aero-compensator and one equipped with it is approximately 10–15%.

Keywords: vehicle off-road performance, wheel rolling resistance, vertical wheel load, vertical load aero-compensator, obstacle classification.

БОХОНКО Андрій Віталійович, аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: andrii.v.bokhonko@lpnu.ua.

Andrii BOKHONKO, PhD student at the Department of Machine Design and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, e-mail: andrii.v.bokhonko@lpnu.ua.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1716

Булік Ю.В., Павлюк В.І., Куць Н.Г., Онищук В.П.
Луцький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС КОНІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ З КРУГОВОЮ ФОРМОЮ ЗУБІВ У ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСАХ ТРИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Представлено методику проектування конічних зубчастих коліс із круговими профілями зубів у системах 3D CAD. Через відсутність вбудованих інструментів для створення таких типів механізмів на платформах Creo, NX і Catia, запропоновано спеціальний підхід до параметричного моделювання. Метод заснований на побудові сферичної евольвентної поверхні, що спрощує математичний опис геометрії зубчастого колеса та забезпечує високу точність моделювання. Використання параметричних рівнянь забезпечує повну асоціативність у середовищі САПР, сприяючи швидким змінам конструкції та інтеграції в більш широкі інженерні системи. Особливу увагу приділено покроковій процедурі конструювання такого типу шестерні в програмному середовищі Creo. Це забезпечує практичну застосовність і відтворюваність методу для інженерних цілей. Розроблений підхід також добре узгоджується з процесами адитивного виробництва, дозволяючи безпосередньо використовувати згенеровані моделі для 3D-друку без подальших модифікацій. Це значно прискорює процес створення прототипу та виробництва. Ефективність запропонованої методики перевірена побудовою зубчастих коліс в Creo. Крім цього, дана методика може бути адаптована для інших типів зубчастих передач, у тому числі із гвинтовими, спіральними та евольвентними зубами. Вказано на необхідність автоматизації запропонованого процесу побудови за допомогою інструментів UDF, що доступні у CAD-програмах тримірного моделювання, або API функцій.

Ключові слова: проектування, зубчасте зачеплення, круговий зуб, сферична евольвента, параметризація, зборка.

ВСТУП

Проектування зубчастих зачеплень у системах тримірного моделювання пов'язане з низкою технічних труднощів. Особливо складною є побудова конічних передач із круговим профілем зуба, яка потребує високої геометричної точності, складного математичного опису та значних витрат часу при реалізації в CAD-середовищі.

У зв'язку з цим розробка методики побудови параметричних моделей зубчастих передач із круговим профілем зуба є актуальним та практично значущим завданням. Така методика дозволить забезпечити повноцінну інтеграцію створених моделей у загальну конструкторську систему, зберігати асоціативні зв'язки між елементами конструкції та істотно підвищити якість і швидкість проектування, що є особливо важливим при «низхідному» методі моделюванні [1]. Також запропонований підхід має особливу практичну цінність у контексті розвитку технологій адитивного виробництва, зокрема 3D друку. Завдяки високій точності тривимірного моделювання, створені параметричні моделі можуть бути безпосередньо використані для виготовлення деталей на 3D-принтерах без необхідності подальшої доопрацювання. Це значно скорочує час підготовки виробництва, спрощує процес створення прототипів і дозволяє оперативно отримувати кінцеві вироби з урахуванням індивідуальних конструктивних вимог.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для полегшення процесу побудови зубчастих передач у деяких CAD-системах передбачено автоматизовані модулі побудови зубчастих коліс. Зокрема, у SolidWorks, Autodesk Inventor та Solid Edge використовується модуль GearTrax [2], який дозволяє швидко створювати і редагувати параметричні моделі передач. Однак для таких модулів не передбачена інтеграція з Creo, NX, Catia і тому доводиться застосовувати імпортовані моделі у форматах step, iges. При цьому імпорт моделей із зовнішніх джерел призводить до втрати параметризації та обмежує можливості редагування. Тому розробка алгоритму побудови зубчастих передач у програмному середовищі таких CAD-систем є важливою та актуальною задачею.

Існують різноманітні методики розрахунку та проектування зубчастих коліс [3...6]. Проте використання даних методик потребує приведення математичного апарату до такої форми, яка робить можливим їх застосування з інструментами побудови поверхонь і кривих, доступних у вищезгаданих CAD-програмах [7].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження та вибір методики розрахунку зубчастих передач, математичний апарат якого може бути застосований з інструментами побудови конструктивних елементів (поверхонь, кривих тощо) CAD програм.

Розробка методики побудови конічного зубчастого зачеплення із круговими зубами в програмних комплексах Cgeo, NX та Catia.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На практиці використовують конічні передачі як із сферичною евольвентою, так і октаїдальні [4, 5]. Для спрощення задачі розроблено методику побудови конічної передачі із сферичною евольвентною поверхнею зубів. Цей вибір пояснюється більш простою математичною моделлю, що описує геометрію евольвентного зубчастого зачеплення.

Загалом спосіб побудови зубчастого зачеплення із прямим зубом було відображено в роботах [8, 9]. Однак побудова конічного зубчастого колеса із круговим зубом є дещо складнішою задачею, оскільки лінія зуба (лінія перетину співвісної площини колеса з поверхнею зуба) в даному випадку не є прямою.

Для виведення формули сферичної евольвенти підготовлено розрахункові схеми представлені на рисунках 1 та 2. На рисунку 1 поверхні K_1 і K_2 – це відповідно дільний та основний конуси конічного колеса. Якщо колеса виконані без зміщення, то дільний конус є також і початковим конусом. Площина Π будується наступним чином: спочатку будується площина дотична до дільного конуса вздовж прямої OA , потім побудована площина повертається навколо осі OA на кут α . Площина Π дотикається до основного конуса вздовж прямої OK [2, 3].

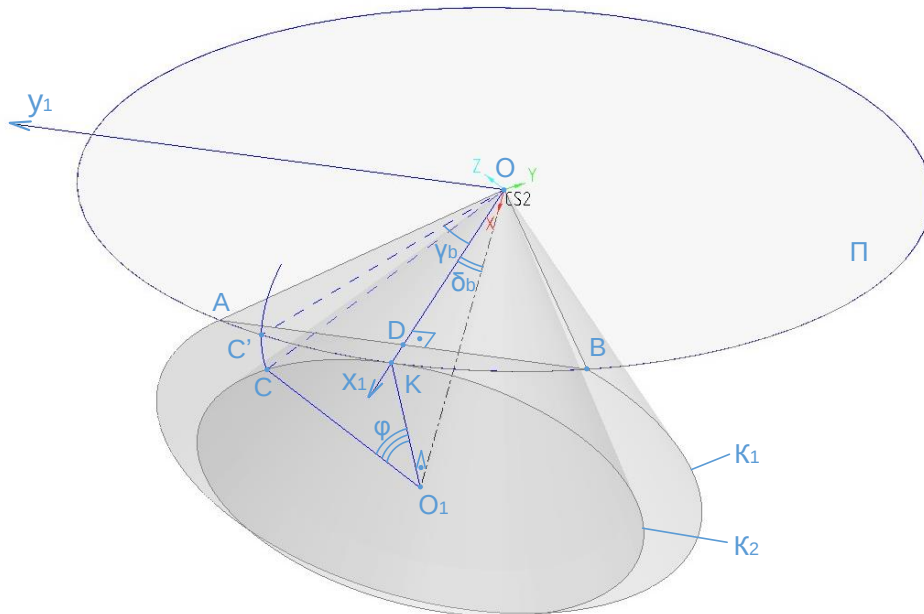


Рисунок 1 – Сферична евольвента

При перекочуванні без ковзання площини Π по основному конусу, відрізок CA , що лежить на цій площині, утворює бокову поверхню зуба. При цьому точка C' описує сферичну евольвенту, що відповідає зовнішньому торцевому січенню колеса. Маючи сферичну евольвенту, можна побудувати поверхню зуба. Для цього в Cgeo необхідно застосувати інструмент «Поверхня» і з'єднати криву сферичної евольвенти з вершиною конуса O .

Система координат xyz незмінно зв'язана з конічними поверхнями. Вісь Ox направлена вздовж осі OO_1 , а площина xOy проходить через точку C .

В якості аргументу для визначення положень точок C і C' вибрано кут φ повороту колеса. Діаметр основи основного конуса d_b , по якому перекочується дуга AB можна визначити із подібності трикутників $\triangle OFO_2$ і $\triangle OO_1K$ (рис. 2):

$$d_b = 2 \cdot OA \cos \alpha \cos(90 - \delta) = m_e z \cos \alpha, \quad (1)$$

де α – кут зачеплення;

δ – кут дільного конуса шестерні (колеса);

m_e – торцевий модуль;

z – число зубів шестерні (колеса).

Координати точки C_1 в локальній системі координат $x_1y_1z_1$ [8]:

$$x_1 = OA \cos\left(\frac{d\varphi}{2 \cdot OA}\right), \quad y_1 = OA \sin\left(\frac{d\varphi}{2 \cdot OA}\right), \quad z_1 = 0. \quad (2)$$

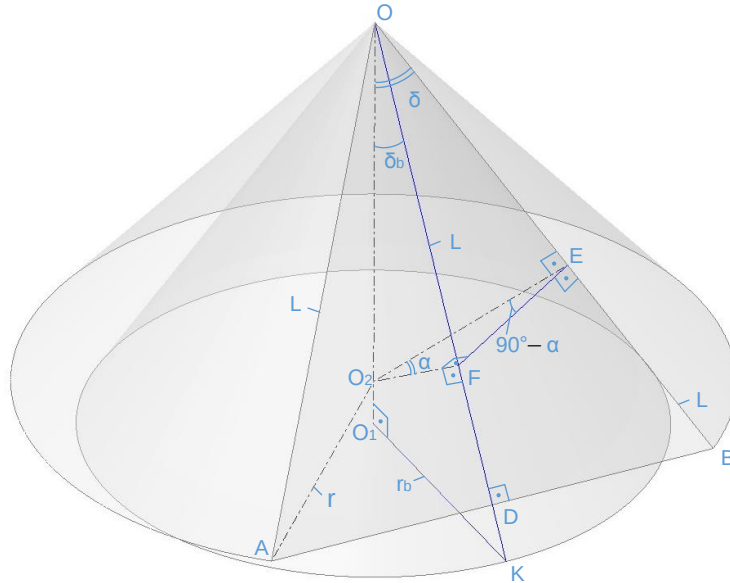


Рисунок 2 – Схема до визначення параметрів сферичної евольвенти

В роботі [8] координати x, y, z точки C' в системі $Oxyz$ визначено через координати x_1, y_1, z_1 цієї ж точки в системі $Ox_1y_1z_1$ за допомогою кутів Ейлера:

$$x = x_1 \cos \delta, \quad y = -x_1 \sin \delta \sin \varphi - y_1 \cos \varphi, \quad z = x_1 \sin \delta \cos \varphi + y_1 \sin \varphi. \quad (3)$$

Для утворення кругової поверхні зуба будується ряд сферичних евольвент із вибраним кроком, положення яких задається точкою M' , що лежить на дузі кола радіусом R_u (рис. 3). Положення точки M' задається через кут α_e та довжину відрізка l_e (рис. 4).

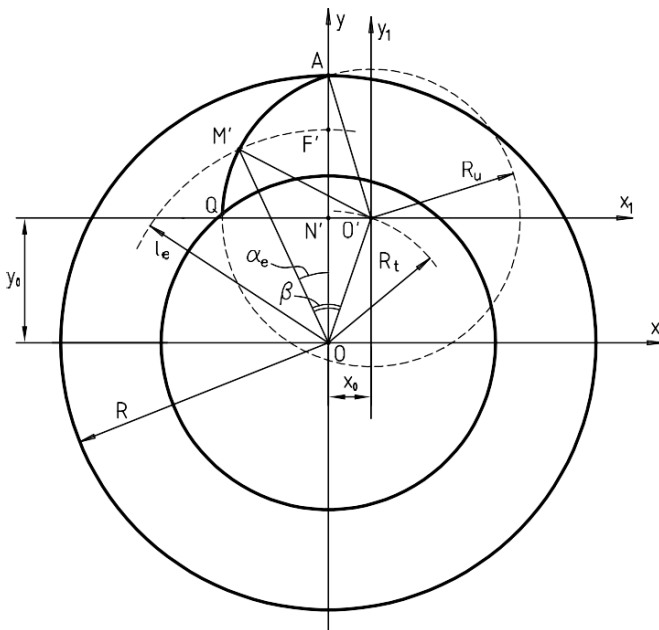


Рисунок 3 – Визначення параметрів утворюючого колеса з круговими зубами

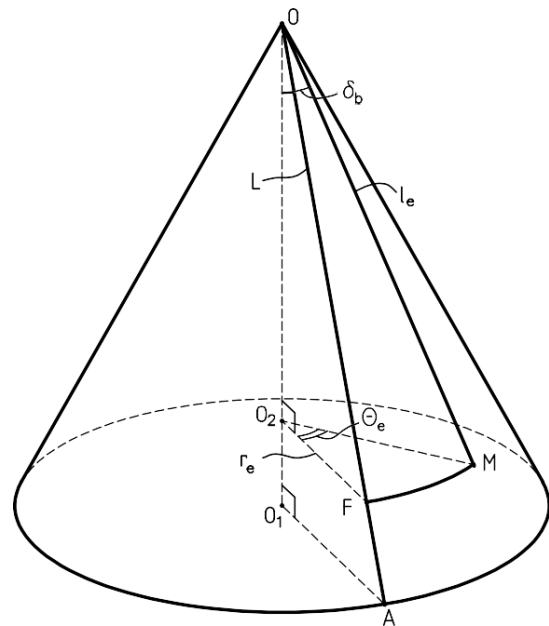


Рисунок 4 – Положення сферичної евольвенти на основному конусі колеса

На рисунку 3 $OA = R = L$, $y_0 = ON'$, $x_0 = N'O'$, тоді $N'O'$ знаходиться із формули:

$$S_{\square AO'O} = \frac{1}{2} OA \cdot O'N'.$$

З іншого боку площа $S_{\square AO'O}$ знаходиться з виразу:

$$S_{\square AO'O} = \sqrt{p(p-OA)(p-OO')(p-O'A)},$$

де

$$p = R_u + R_t + L.$$

$$x_0 = \frac{2 \cdot \sqrt{p(p-L)(p-R_t)(p-R_u)}}{L}$$

$$y_0 = \sqrt{R_t^2 - x_0^2}.$$

$$M'O'^2 = M'O^2 + OO'^2 - 2M'O \cdot OO' \cos \beta.$$

Звідси

$$\beta = \arccos \frac{l_e^2 + R_t^2 - R_u^2}{2l_e R_t}.$$

Оскільки

$$N'O = OO' \cos \angle N'OO',$$

то

$$\angle N'OO' = \arccos \frac{y_0}{R_t}.$$

Так як $\alpha_e = \beta - \angle N'OO'$, то остаточно отримано:

$$\alpha_e = \arccos \frac{l_e^2 + R_t^2 - R_u^2}{2l_e R_t} - \arccos \frac{y_0}{R_t}. \quad (4)$$

Довжина дуги FM рівна

$$FM = r_e \theta_e.$$

Так як $FM = F'M' = l_e \alpha_e$ та $r_e = l_e \sin \delta_b$, то

$$\theta_e = \frac{\alpha_e}{\sin \delta_b}. \quad (5)$$

Положення двох сусідніх бічних поверхонь впадини зубів (рис. 5) задається кутом ψ , який визначається за формулою:

$$\psi = \frac{m_e \cdot 180^\circ}{4r}.$$

Враховуючи, що $r = \frac{m_e \cdot z}{2}$, то

$$\psi = \frac{360^\circ}{4z}. \quad (6)$$

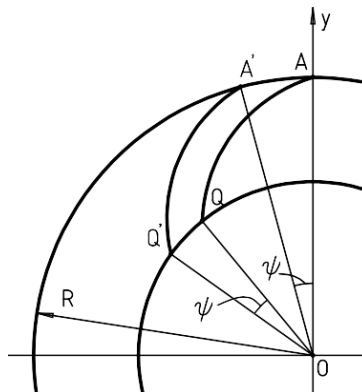


Рисунок 5 – Схема до визначення положення лінії зуба утворюючого колеса

Практичне застосування розробленої методики побудови зубів конічного колеса з круговим зубом показано із використанням програмного комплексу Сгео. Зокрема, на рисунку 6 наведено рівняння сферичної евольвенти у параметричній формі у вікні інструмента «Крива із рівняння».

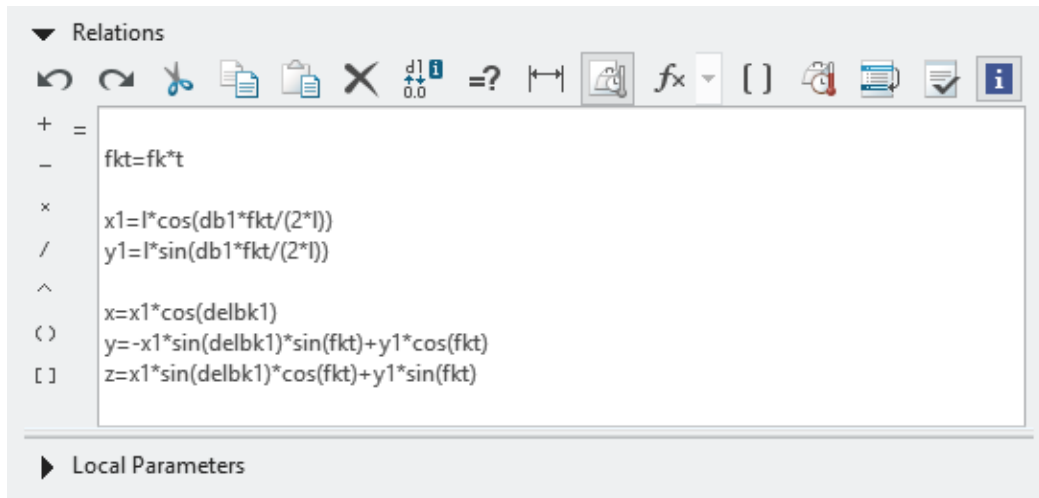


Рисунок 6 – Параметричні рівняння сферичної евольвенти

На рисунку 7а показано бокову поверхню зуба, що утворена за допомогою інструмента «Поверхня» спряженням сферичних евольвент. Завершену модель зубчатого колеса представлено на рисунку 7б.

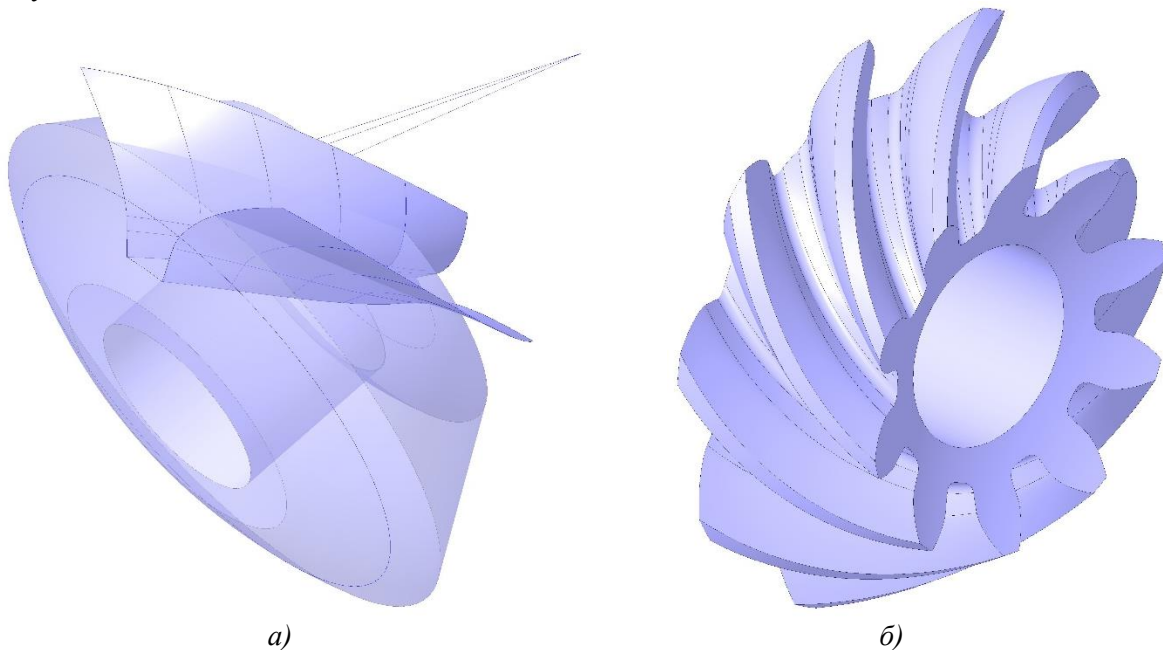


Рисунок 7 – Тримірна модель конічного зубчатого колеса із круговим зубом

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати підтверджують ефективність представленої методики побудови бічної поверхні зуба. Застосування сферичної евольвенти дозволяє значно спростити математичний опис профілю зуба, що суттєво полегшує його реалізацію засобами параметричного моделювання. Отримані моделі є стійкі до змін геометрії, що дозволяє швидко адаптувати конструкцію без втрати функціональності.

Застосування кривих, заданих параметричними рівняннями, в інструменті «Крива із рівняння» дає змогу із необхідною точністю відтворити складну геометрію сферичної евольвенти.

Перевагою запропонованого методу є можливість повної інтеграції побудованих моделей у конструкторське середовище Creo, NX та Catia без потреби використання сторонніх плагінів для

імпорту зовнішніх моделей, що зберігає асоціативні зв'язки між елементами моделі та підвищує точність і надійність подальших етапів проектування.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на адаптацію методики для моделювання коліс із косими, спіральними та евольвентними зубами тощо. Варто також провести дослідження щодо автоматизації запропонованого процесу побудови за допомогою інструментів UDF, що доступні у CAD-програмах тримірного моделювання, або API функцій.

ВИСНОВОК

Розроблено методику для побудови конічної зубчастої передачі із круговим профілем зуба у середовищі тривимірного моделювання CAD-систем, які не мають вбудованих засобів автоматизованого проектування елементів такого типу.

Для формування профілю зуба за геометричну основу використовується сферична евольвента. Такий метод спрощує математичний опис та забезпечує високу точність побудови.

Застосування параметричних рівнянь та зазначених інструментів побудови кривих дозволяє зберегти повну параметризацію моделі та забезпечує асоціативність усіх елементів моделі, що є особливо важливим при використанні «низхідного» моделювання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Павлюк В.І., Булік Ю.В., Сітовський О.П. (2024). Проектування технологічного обладнання «низхідним» моделюванням із застосуванням скелетонів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал, 1 (22), С. 279–284. / URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1370>.
2. Camnetics, Inc. [Електронний ресурс]: офіційний сайт. URL: <https://camnetics.com/>
3. Bevel Gear: Fundamentals and Applications. Jan Klingelnberg. Publisher: Springer Vieweg. Year: 2016 – 328 p.
4. Gleason Bevel Gear Technology: Basics of Gear Engineering and Modern Manufacturing Methods for Angular Transmissions. Hermann J. Stadtfeld, Gleason Works (Rochester, N.Y.). Publisher: Gleason Works, 2014 – 503 p.
5. Gear Geometry and Applied Theory. Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes. Publisher: Cambridge University Press, 2004 – 800 p.
6. Gears: Volume 1: Geometric and Kinematic Design. Vullo, Vincenzo. Publisher: Springer International Publishing, 2020 – 844 p.
7. Creo Parametric 8.0: Advanced Assembly Design and Management by Ascent - Center for Technical Knowledge (Author). Publisher: ASCENT, Center for Technical Knowledge (November 20, 2023). – 652 p.
8. Пустюльга С.І., Гандзюк М.О., Булік Ю.В. Основи проектування в ProENGINEER Навчальний посібник. – Луцьк: Редакційно-видавничий відділ ЛНТУ, 2012. – 281с.
9. Fuentes-Aznar, A., Gonzalez-Perez, I., & Pasapula, H. K. (2017, February 27). Computerized design of straight bevel gears with optimized profiles for forging, molding, or 3D printing. Thermal Processing. URL: <https://thermalprocessing.com/computerized-design-of-straight-bevel-gears-with-optimized-profiles-for-forging-molding-or-3d-printing/>

REFERENCES

1. Pavliuk V.I., Bulik Yu.V., Sitovskiy O.P. (2024). Proektuvannia tekhnolohichnoho obladnannia «nyzhidnym» modeliuvanniam iz zastosuvanniam skeletoniv. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyi zhurnal, 1 (22), S. 279–284. / URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1370>.
2. Camnetics, Inc. URL: <https://camnetics.com/>.
3. Bevel Gear: Fundamentals and Applications. Jan Klingelnberg. Publisher: Springer Vieweg. Year: 2016 – 328 p.
4. Gleason Bevel Gear Technology: Basics of Gear Engineering and Modern Manufacturing Methods for Angular Transmissions. Hermann J. Stadtfeld, Gleason Works (Rochester, N.Y.). Publisher: Gleason Works, 2014 – 503 p.
5. Gear Geometry and Applied Theory. Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes. Publisher: Cambridge University Press, 2004 – 800 p.
6. Gears: Volume 1: Geometric and Kinematic Design. Vullo, Vincenzo. Publisher: Springer International Publishing, 2020 – 844 p.
7. Creo Parametric 8.0: Advanced Assembly Design and Management by Ascent - Center for Technical Knowledge (Author). Publisher: ASCENT, Center for Technical Knowledge (November 20, 2023). – 652 p.
8. Pustiulha S.I., Handziuk M.O., Bulik Yu.V. Osnovy proektuvannia v ProENGINEER Navchalnyi posibnyk. – Lutsk: Redaktsiino vydavnychiy viddil LNTU, 2012. – 281s.

9. Fuentes-Aznar, A., Gonzalez-Perez, I., & Pasapula, H. K. (2017, February 27). Computerized design of straight bevel gears with optimized profiles for forging, molding, or 3D printing. Thermal Processing. URL: <https://thermalprocessing.com/computerized-design-of-straight-bevel-gears-with-optimized-profiles-for-forging-molding-or-3d-printing/>

Y. Bulik, V. Pavliuk, N. Kuts, V. Onyshchuk. Features of modeling bevel gear wheels with circular tooth profile in 3d modeling software

A methodology for designing bevel gears with circular tooth profiles in 3D CAD systems is presented. Due to the lack of built-in tools for creating such types of mechanisms on platforms such as Creo, NX, and Catia, a special approach to parametric modeling is proposed. The method is based on the construction of a spherical involute surface, which simplifies the mathematical description of the gear geometry and ensures high modeling accuracy. The use of parametric equations provides full associativity in the CAD environment, facilitating rapid design changes and integration into broader engineering systems. Special attention is paid to the step-by-step procedure for designing this type of gear in the Creo 3D modeling environment. This ensures the practical applicability and reproducibility of the method for engineering purposes. The developed approach is also well consistent with additive manufacturing processes, allowing the generated models to be directly used for 3D printing without further modifications. This significantly speeds up the prototyping and production process. The effectiveness of the methodology is proven through implementation in Creo and can be adapted for other types of gears, including helical, spiral and involute teeth. The need to automate the proposed construction process using UDF tools available in 3D CAD programs or API functions is indicated.

Key words: design, gear meshing, circular tooth, spherical involute, parameterization, assembly.

БУЛІК Юрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>

ПАВЛЮК Василь Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0678-3566>

КУЦЬ Надія Григорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: nadia86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

ОНИЩУК Василь Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: Vasyl.Onyshchuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>

Yurii BULIK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>

Vasyl PAVLIUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0678-3566>

Nadiia KUTS, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: nadia86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

Vasyl ONYSHCHUK, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: Vasyl.Onyshchuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1717

Біліченко В.В., Матвійчук Д.М.
*Вінницький національний технічний університет***ОГЛЯД СУЧАСНИХ ВІБРОАКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ШУМУ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ З МЕТОЮ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ В СИМУЛЯЦІЇ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНА**

Ця стаття розглядає можливості використання різних віброакустичних сигналів, для визначення несправностей, при проведенні параметричної діагностики двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Аналіз праць дослідників показав, що роботи зосереджені на кінцевому визначенні типу несправності та не визначають першопричину виникнення несправності, а також не дають повного опису фізичної складової механізму утворення шуму та вібрацій при виконанні процесу діагностики. В даній статті наведено короткий опис механізму генерації звуку і вібрацій, які виникають безпосередньо при робочому процесі двигуна, що в свою чергу може бути використано як основний параметр при виконанні діагностики та визначенню технічного стану механізму зокрема та двигуна в цілому. Наведено огляд сучасних методів визначення несправностей та діагностики, що базуються на віброакустичному методі та досліджують такі параметри як шум, вібрації, що є одними з ключових для даного методу, та дають найбільш точний та об'єктивний результат у порівнянні з іншими загальноприйнятими методами діагностики технічного стану. В статті описані різні типи несправностей, які можуть бути виявлені віброакустичним методом та безпосередній характер їх впливу на роботу ДВЗ. Виходячи із потреб швидкого визначення характеру і типу несправності, наведені дані в статті можуть використовуватись як алгоритм для побудови моделі, встановленню необхідних вхідних параметрів та подальшої симуляції робочого процесу двигуна в САЕ середовищі Ansys. Наведені методики математичного аналізу дають опис ключових параметрів, які впливають на точність аналізу та в подальшому на ефективність діагностування та виявлення дефектів не залежно від типу ДВЗ, виду палива, наявних електричних компонентів базової системи керування ДВЗ, що в свою чергу є універсальним та ефективним інструментом вирішення поставлених задач. Беручи до уваги широкий спектр та різновид систем керування та ступеню електричного оснащення ДВЗ, універсальність методики спрощує та вирішує значний ряд проблем. Проведений в статті аналіз шуму та вібрацій відіграє важливу роль у визначенні першопричини різного роду несправностей. Компоненти ДВЗ через наявність технологічних зазорів у спряженнях, циклічної зміни навантаження за напрямком та точкою прикладання, незбалансованості та відсутності урівноваження окремих компонентів механізму, створюють шум і вібрації. Тому дуже важливо визначити джерела вібрацій, щоб уникнути відмов у роботі окремих складових механізму та системи зокрема.

Ключові слова: дизельний двигун, модальний аналіз, акустика двигуна, обробка сигналів, діагностування, симуляція, довговічність, САЕ системи.

ВСТУП

Вимірюванням тиску в циліндрі, шуму, вібрації та акустичних сигналів користуються для визначення технічного стану дизельного двигуна [1]. Однак існує складність виокремити з широкого спектру акустичного сигналу необхідний діапазон частот що відповідає за бажаний параметр робочого процесу двигуна. Це пов'язано з конструктивними особливостями двигунів, великою кількістю рухомих механізмів, спектр сигналу яких накладається один на одного або взагалі вступає в резонанс. Отримання сигналів, їх обробка та виділення їх ознак є основними етапами діагностики несправностей ДВЗ [2]. Проведення параметричної діагностики дозволяє ефективно контролювати робочий процес двигуна а також виявити несправності до того, коли ступінь зносу компонентів вийде за допустимі норми встановлені виробником, що завдасть значної шкоди ДВЗ. Раннє виявлення несправностей має переваги, як з точки зору вартості ремонту так і скорочення часу на проведення ремонту механізму, а у випадку комерційного транспорту це є дуже важливим, оскільки зменшує ймовірність незапланованого простою транспортного засобу.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Визначення вібрації є ефективним методом у діагностиці, але об'єктивність вимірювальних значень значною мірою залежить від розташування акустичних датчиків у зв'язку з чим виникають проблеми у їх оптимальному місці розташуванні на досліджуваному об'єкті. Сигнал вібрації можна аналізувати за частотним спектром, піковими або середньоквадратичними значеннями сигналу. Дані значення можуть бути використані для визначення величини дисбалансу, зазорів у спряженнях, технічного стану опор кочення, не співвісності валів та багато іншого [1].

В свою чергу моніторинг тиску в циліндрах двигуна надає розуміння про стан циліндрів та поршневої групи в цілому (ЦПГ), наявність та відсутність проблем з клапанами головки блоку циліндрів (ГБЦ), аналіз моменту впорскування палива що дає розуміння про ефективність згоряння палива в двигуні, однак високі температурні умови зумовлюють використання специфічних датчиків

тиску, що в свою чергу є дорогими та мають короткий термін служби [2].

Викиди шуму при робочому процесі двигуна сприймаються людиною в результаті коливання повітряного тиску що безпосередньо впливає на вушні барабани людського організму. Різні звукові характеристики можуть бути проаналізовані за допомогою рівнів звукового тиску (SPL) і частоти з рівними контурами гучності. Для того щоб отримати рівні, які можуть бути проаналізовані людськими органами чуття їх розділяють на три частотні діапазони А, В, С згідно [3]. При чому частотний діапазон А найбільш точно відповідає людському вуху.

Через вищий ступінь стиснення дизельні двигуни генерують більше шуму порівняно з бензиновими двигунами [4,5]. Вищий ступінь стиснення збільшує навантаження на ЦПГ що зумовлює конструктивні особливості деталей у порівнянні з бензиновими двигунами, збільшення запасу міцності та відповідно і маси рухомих деталей. Це приводить до загального збільшення вібрацій в системі та відповідно і збільшення шуму при робочому процесі. Також слід зазначити що через велику кількість зовнішніх впливів, забруднення деталей та складних умов роботи дизельних двигунів чутливість вібро акустичних датчиків знижується, в результаті чого аналіз шуму ускладнюється, тому методи обробки сигналів аналізують інформацію про події у фіксований проміжок часу в залежності від положення кривошипно-шатунного механізму.

Методики визначення розділяють на короточасні перетворення Фур'є (Short Time Fourier Transformations STFT), вейвлет перетворення (Wavelet Transformation WT), білінійний часово частотний розподіл (Bilinear Time Frequency Distribution BTFD) [6], розподіл Вінгера – Вілле (Wigner – Ville WVD), розподіл Чоя – Вільямса (CWD). Якщо дані методи використовувати до перехідних сигналів спектр частот яких огинає різного роду перешкоди, утворюються пульсації, які можуть призвести до втрати інформації [8]. Однак дані методи мають кращу частотну та часову роздільну здатність порівняно зі звичайними перетвореннями Фур'є.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою цієї роботи є аналіз найпоширеніших методів обробки сигналів з ціллю використання обраної методики для симуляції віброакустичного аналізу робочого процесу двигуна в САЕ системах. Авторами були представлені різні важливі властивості цих методів, їх ефективність була оцінена шляхом застосування даних отриманих від двигуна, що працює в різних умовах випробувань. Ця стаття представляє комплексне дослідження цих методів та може бути джерелом інформації для розуміння фізичної складової робочих процесів двигуна, яка може бути використана для подальшого моделювання та симуляції з ціллю створення технічних засобів необхідних для проведення параметричної діагностики стану дизельного двигуна.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналізуючи проведені дослідження можна виділити що Hambric та інші [3] досліджували способи оптимізації конструкцій для зменшення вібрацій. Nuawi та інші [4] запропонували статистичний підхід для характеристики втомної міцності металу. Ji та інші [5] розглянули моделювання екструдованих алюмінієвих конструкцій для прогнозування віброакустичних реакцій. Duffor відстежував модуляцію ультразвукових коливань через зразок з тріщинами [6]. Aumerich та інші [8] досліджували пошкодження внаслідок ударів у композитних ламінатах. Trochidis та інші [9] досліджували нелінійні особливості розподілу (ZAM) було визначено більш чутливий новий індекс, який корелював з розмірами тріщин. Urban та інші [10] провели аналіз віброакустичних методів у біомедицині. Jia та інші розробили індекс нечутливий до навантаження пошкоджень (Lidi) для відстеження росту тріщин. Anwar вимірював вібрації на коробці передач у місці з'єднання з двигуном [12]. Wang et та інші [13] запропонували дослідження акустичних параметрів зв'язаних систем на основі нечітких параметрів. Gorski та інші [14] використовували акустичні методи та обробку сигналів для аналізу зносу інструментів. Hipol вивчав скінченно-елементний аналіз для аналізу аерокосмічних конструкцій [15]. Mohanty та інші [16] визначали та прогнозували поведінку опорних підшипників двигуна за допомогою адаптивних алгоритмів шуму. Cheng та інші [17] прогнозували початок згоряння в дизельних двигунах, використовуючи швидкість вібрацій головки блоку циліндрів. Dukas та інші [18] використовували методи акустичного емісійного зондування для діагностики несправностей. Flett та інші [19] використовували метод Наїва-Байєса для діагностики та виявлення несправностей клапанного механізму.

Найбільш цікавим є вивчення збудження та вібрацій у процесах згоряння палива та руху поршня оскільки їхній спектр шумової емісії впливає значною мірою на емісію двигуна в цілому. Найбільш значущі роботи за попередньо наведеним параметром відображені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Огляд наукових робіт

Автори	Тип двигуна	Метод	Мета
Jung I., Jin, J., So H., Nam C. et al.[19]	Чотирьох циліндровий дизель	Зміна впорскування палива	Класифікація індексів пов'язаних з шумом
Ingemar Andersson, Tomas McKelvey, Martin Larsson[20]	Шести циліндровий дизель	Енергія вібрацій	Оцінка параметрів фазового горіння
Zhen Peng ,Weisong Xie, Guichang Zhang , Zhenyu Hong, Junhong Zhang[21]	Чотирьох циліндровий дизель	Імітація поперечного руху юбки поршня	Спостереження за впливом геометричних параметрів юбки поршня на його бічні переміщення
N.Dolatabadi, B.Littlefair, M.Dela Cruz,S. Theodossiades, S.J.Rothberg, H. Rahnejat[22]	Одноциліндровий дизель	Аналіз прискорень блоку двигуна	Визначення найбільш чутливих місця на блоці двигуна
Yeow-Chong Tan, Zaidi Mohd Ripin[23]	Чотирьох циліндровий дизель	Визначення неврівноважених мас	Моделювання результуючих коливань блоку двигуна

Аналізуючи основні інструментами обробки сигналів можна виділити декілька найбільш важливих. Функція спектральної щільності потужності (Ψ^2) яка позначає випадковий процес, який забезпечує частотний склад даних з точки зору їх середнього квадратичного значення [9]. Середнє квадратичне значення часового проміжку в діапазоні частот $[\omega, \omega + \Delta \omega]$ можна отримати, пропустивши зразок через фільтр з різними частотними характеристиками зрізу, а потім обчисливши середнє квадратичне значення вихідного сигналу. Середнє квадратичне значення $T \rightarrow \infty$, тобто при збільшенні T до нескінченності середнє значення квадрата наближається до середнього квадратичного значення.

$$\psi^2(\omega, \Delta\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T x^2(t) dt}{T} \quad (1)$$

Частотний аналіз в часі, або по іншому перетворення Фур'є математично можна уявити у вигляді:

$$f(\omega) = \int_0^T f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

Наведений аналіз використовують коли частотний склад сигналі не змінюється з часом. В іншому випадку використовують часово – частотний аналіз або вейвлет аналіз який є більш підходящим [10]. Часово – частотний аналіз підходить для обробки сигналів з повільною зміною частоти, наприклад тих що генеруються під час зменшення обертів двигуна тоді як вейвлет – аналіз більше підходить для швидких змін частот [11]. При часово – частотному аналізі сигнал розбивається на невеликі інтервали, а потім для кожного інтервалу використовуються перетворення Фур'є [12]. Обсяг вибірки може бути використаний для зміни роздільної здатності вихідного сигналу. Коротша за об'ємом вибірка має вищу роздільну здатність у частотній області і навпаки. Вища роздільна здатність у часі на вищих частотах дає змогу розрізняти короткі послідовності події за допомогою вейвлет – перетворення. Короткочасний частотний аналіз передбачає розкладання сигналу на набір частотних гаусових функцій і може бути представлений як показано нижче, де $x(t)$ – вхідний сигнал, а $h(t-T)$ – вибіркова функція.

$$STFT(\tau, f) = \int_0^T x(t) h^*(t-T) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

Функція Вінера-Віллі має наступний квадратичний часово - частотний розподіл та може бути представлена у вигляді [9]:

$$STFT(t, f) = \int_0^T x\left(t - \frac{T}{2}\right) x^*\left(t + \frac{T}{2}\right) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

Розглядаючи вейвлет аналіз потрібно виділити, що він проектує сигнал на спільну площину час-частота та є чутливим до перехідних процесів у сигналах. Одним із головних недоліків різних методів обробки в часовій частотній області є утворення бриж (ripples), що ускладнює вилучення корисної інформації [13]. Під час вейвлет аналізу частотна роздільна здатність є вищою на низьких частотах, тоді як часова роздільна здатність є кращою для високих частот. Таким чином, результати вейвлет-аналізу є точнішими порівняно з іншими методами [14]. Метод вейвлет перетворення дозволяє представити сигнал у вигляді сімейства функцій із нульовим середнім значенням, які називаються вейвлетами. Вони забезпечують високу часову роздільну здатність і не спричиняють перехресних перешкод. Функція спектральної щільності потужності (PSD) є подібною до короточасного частотного аналізу, тоді як вейвлет перетворення представляє собою лінійне перетворення. Квадрат модуля вейвлет перетворення називається скалограмою. Одна скалограма може охоплювати весь чутний діапазон частот із часовою роздільною здатністю приблизно 0,1 мс для високочастотних компонентів [11]. Це робить скалограму особливо придатною для аналізу таких сигналів, як шум тертя та скрипіння, які потребують широкосмугового частотного аналізу. Математично для функції $f(t)$ комплексне вейвлет перетворення визначається [15]:

$$CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{\Psi(t-b)}{a} dx \quad (5)$$

де $\Psi(t)$ – материнський вейвлет; $f(t)$ – аналізований сигнал; a – масштабний коефіцієнт; b – коефіцієнт зсуву; $CWT(a, b)$ вейвлет – коефіцієнти.

Функція материнського вейвлета $\Psi(t)$ повинна мати нульове середнє значення та експоненціально спадати до нуля, математично можна зобразити так :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

Функція та її перетворення Фур'є повинні задовольняти умову допустимості, тобто:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Psi(t)^2}{|f|} dt \leq 0 \quad (7)$$

Параметри дилатації (масштабування), що визначає наскільки розтягується або стискається вейвлет та параметри трансляції (зсуву), який визначає де саме на часовій осі застосовується вейвлет, у неперервному вейвлет-перетворенні (CWT) зазнають варіацій, що ускладнює його використання. Дискретизація сигналів може певною мірою допомогти зменшити цю проблему оскільки параметри перестають змінюватись безперервно. Неперервне вейвлет-перетворення CWT для дискретного сигналу X_m визначається через його вибіркові точки даних m, n (точки дискретизації) і часовий крок дискретизації Δt , математично це можна зобразити як :

$$CWT = \sum_{m=0}^{N-1} X_m \Psi^* \left[\frac{(m-n)\Delta t}{X_j} \right] \quad (8)$$

де $t = m\Delta t; b = n\Delta t$, m та n змінні $0, 1, 2, \dots, N-1, N_{y0}$

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основні джерела шуму та вібрацій у двигуні використовуються для оцінювання продуктивності автомобільних двигунів, що є необхідним для проектування та планування систем. Це включає тестування різних двигунів із різними конфігураціями за змінних умов впорскування палива [1, 2, 3]. Основними джерелами шуму є структурний шум та повітряний шум. Повітряний шум

(airborne noise) це шум що поширюється через повітря. Структурний шум (structure – borne noise) це низькочастотний звук, що передається через конструкційні елементи.

Проведені експериментальні та аналітичні дослідження можна охарактеризувати та класифікувати наступним чином. Загальні вимірювання рівня звукового тиску. Ранжування та ідентифікація джерел. Дослідження шляхів передачі шуму. Суб'єктивна та об'єктивна оцінка, що розглядає особливості різних джерел шуму, які виникають в двигуні. Шум спричинений згорянням, оскільки процес згоряння є ключовим для проектування та налаштування продуктивності автомобільної системи. Шум і вібрації, спричинені згорянням, передаються через стінки гільзи циліндра, стінки циліндра та шатун у навколишнє середовище.

Структурне затушення також впливає на шум, що випромінюється двигуном. Більша жорсткість блоку циліндрів призводить до підвищення резонансних частот. Скорочення періоду затримки згоряння веде до зменшення шуму від згоряння. Також на рівень шуму впливають ступінь стиснення, тиск повітря на впуску, рециркуляція випускних газів, структурне затушення різних деталей [20].

Основними джерелами шуму у поршневому механізмі є удари від пальця (pin tickling), вторинний рух поршня, стукіт (rattling). Шум від бічного руху поршня є найбільш значущим у поршневому вузлу, особливо при холодному запуску на холостому ходу [21].

Якщо розглядати підсистему газорозподільного механізму клапанів то можна виділити три основних джерела шуму. Прискорення кулачка (CAM), відкриття та закриття клапанів викликає високочастотні вібрації. При ударах клапанів спостерігаються імпульсні стрибкоподібні рухи, коли відбувається контакт між кулачком, штовхачем і сідлом клапана на високих швидкостях. Третім джерелом шуму є фрикційні вібрації, що є низько – швидкісними вібраціями, що виникають через мікро контакт нерівностей між кулачком і штовхачем.

Шум зубчастого приводу (rattle noise) спричинений нерівномірним крутним моментом від кривошипно – шатунного механізму до приводу, спостерігається під час передачі моменту та є однією з основних проблем [22]. Зазори між зубцями зачеплення викликають вібраційні удари зубчастих коліс на низьких обертах двигуна. Косозубе зачеплення є основним джерелом виючого шуму (whining noise). Рівень цього шуму залежить від кількості та розміру зубців у зачепленні, крутильних навантажень, розташування зубчастого приводу [23].

Шум потоку паливної суміші. Низькочастотний шум на впуску спричинюється турбулентністю у впускних каналах, залежить від площі клапана та швидкості потоку [24]. Процеси наповнення та випуску у вихлопному каналі викликають вихлопний шум [25]. Турбонаддув також є важливим джерелом аеродинамічного шуму.

Шум у підшипникових вузлах. Опорні підшипники кочення колінчастого валу та шатунні підшипники кочення мають зазори, які спричиняють шум [26]. Крутильні моменти призводять до виникнення шуму (rumbling noise) [27]. Для зниження цього типу шуму використовуються методи оптимізації зазорів, застосування демпферів колінчастого валу, внесення конструктивних змін в кількість опор для більш рівномірного навантаження на опори.

Також слід виділити шум в приводних ремнях та ланцюгах де відбуваються удари при зачепленні та полігональний ефект, що залежить від натягу, швидкості та кількості зубців у зачепленні. Загальний рівень шуму позн.8, робочого процесу двигуна можна розкласти на складові позн.1 – 7, як показано на рис.1. Вимірювання здійснювались на відстані 1 м. в закритій камері для дизельного двигуна, де 1 це шум від згоряння палива, 2 шум від ударів поршня, 3 шум вентилятора, 4 шум роботи зубчастого приводу, 5 шум роботи паливного насоса, 6 шум роботи клапанів, 7 інші джерела шуму.

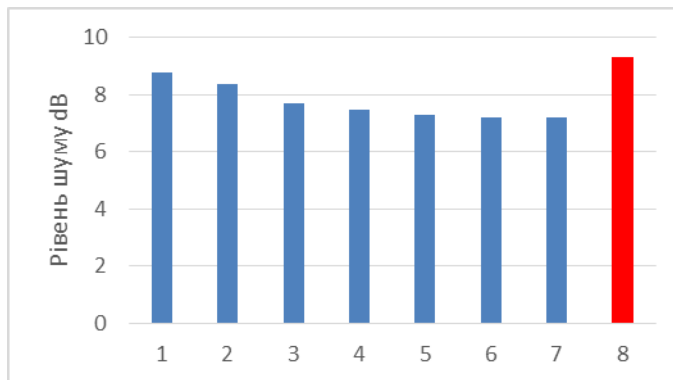


Рисунок 1 – Рівні шуму робочого процесу дизельного двигуна

Механізми утворення шуму від різних підсистем двигуна можна представити у вигляді блок-схеми, представленої на рисунку 2

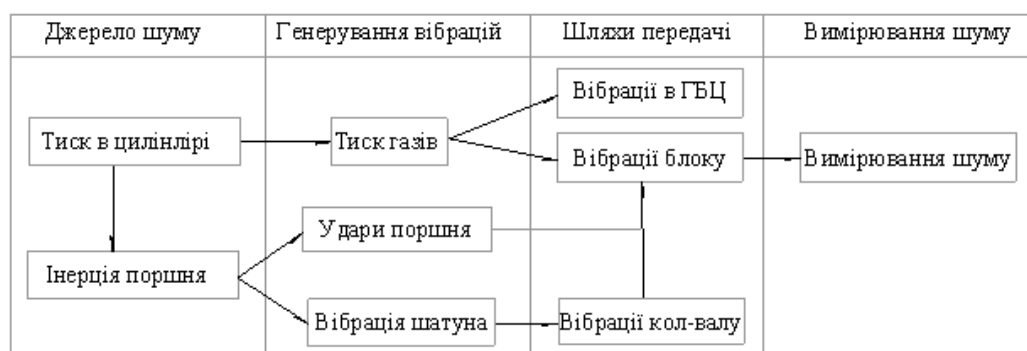


Рисунок 2 – Схематичне відображення механізмів утворення шуму

ВИСНОВКИ

На рис. 1 та 2 представлено механізм утворення шуму від різних джерел у двигуні, а також графіки рівнів шуму підсистем двигуна. Як видно з наведених рисунків, шум згоряння та шум ударів поршня складають основну частку загального шуму (близько 80%). Тому слід зосередити увагу саме на цих аспектах акустики двигуна та виконувати подальші дослідження саме для цієї підсистеми двигуна. Подальші дослідження доцільно виконувати за допомогою використання CAE програмного забезпечення ANSYS та додаткових модулів ANSYS Fluent для моделювання процесів горіння і гідродинаміки, ANSYS Mechanical для вивчення динамічних характеристик (вібрацій та акустики) з подальшим аналізом в ANSYS Acoustic для вивчення акустичних характеристик. Проведений модальний аналіз системи в ANSYS Mechanical дозволить визначити власні частоти та форми коливань компонентів двигуна. В свою чергу проведений гармонічний аналіз дозволить отримати відгук системи на динамічні навантаження. Це дозволить визначити вібраційні характеристики двигуна. Оскільки наведені результати дослідження показують що шум ЦПГ вносить найбільший вклад в спектр шуму тому в подальшому, доцільно використати додатковий модуль ANSYS Acoustic, що дозволить дослідити як зміни зазорів в ЦПГ впливають на генерацію шуму та вібрацій. Після проведення симуляції отримаємо вібраційні і акустичні діаграми, які в подальшому можуть бути використані для створення технічних засобів необхідних для виконання параметричної діагностики дизельного двигуна, а також можуть бути напряму використані для дослідження технічного стану двигуна, шляхом порівняння параметричних даних двигуна без пробігу (еталону) та досліджуваного об'єкту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kaisan M.U., Yusuf L.O., Ibrahim U., Narayan S.(2020). Effects of propanol and camphor blended with gasoline fuel on the performance and emissions of a spark ignition engine. ACS Omega, vol. 5, No.41 26454–26462.
2. Sheng G.(2012). Vehicle noise sound vibration and sound quality. Warrendale Pennsylvania USA, ISBN- 978-0-7680-3484-4.
3. Hambric та інші. (2016). Engineering vibroacoustic analysis, methods and applications. ISBN: 978-1-119-95344-9.
4. Nuawi та інші. (2013). Time domain analysis method of the impulse vibro-acoustic signal for fatigue strength characterization of metallic material. Procedia engineering volume 66539-548.
5. Delvecchio S., Bonfiglio P., Pompil F. (2018). Vibro-acoustic condition monitoring of internal combustion engines, a critical review of existing techniques, mechanical systems and signal processing. Volume 99-661-683.
6. Philippe D. (2006). A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 119 1463
7. Creixell M. (2018). Computational reduction techniques for numerical vibro-acoustic analysis of hearing aids. Technical University of Denmark, department of electrical engineering.
8. Aymerich та інші. (2010). Experimental study of impact-damage detection in composite laminates using a cross-modulation vibro-acoustic technique. Volume 9, issue 6, 541-553.

9. Trochidis та інші. (2014) Analysis of vibroacoustic modulations for crack detection, a time-frequency approach based on Zhao-Atlas-Marks distribution, shock and vibration. Volume article id 102157, 8 pages, <https://doi.org/10.1155/2014/102157>.
10. Urban M.W., Alizad A., Aquino W., Greenleaf J.F., Fatemi M. (2011). A review of vibro-acoustography and its applications in medicine, current medical imaging. Volume 7, issue 4, 350-359.
11. Jun J. (2017). Analysis of load effect on nonlinear vibro-acoustic modulation used in on-line monitoring of fatigue cracks, smart materials and structures. Volume 26, number 9.
12. Ahmida, Anwar M. (2018). Condition monitoring and fault diagnosis of a multi-stage gear transmission using vibro-acoustic signals. Doctoral thesis, University of Huddersfield.
13. Yue W., Di W., Lei W., Xiaojun W. (2018). Statistical energy analysis for vibro-acoustic coupled system with fuzzy parameters. Engineering computations, volume 35, issue 2, 565-579.
14. Jarosław G. та інші. (2019). Use of cutting force and vibro-acoustic signals in tool wear monitoring based on multiple regression technique for compreg milling. Bioresources, vol.14.
15. Hipol, Philip J. (1989). Finite element prediction of vibro-acoustic environments. SAE transactions, volume 98, 1881–1889.
16. Mohanty та інші. (2015). User identification of keystroke biometric patterns with the cognitive RAM weightless neural net, advances in machine learning and signal processing. Proceedings of MALSIP, springer international.
17. Yong C., Juan T., Shaobo J., Minli H. (2012). Combustion timing determination based on vibration velocity in HCCI engines. Mechanism and machine theory, volume 58, 20-28.
18. Brian D., James H. (2017). Acoustic emission characteristics of a single cylinder diesel generator at various loads and with a failing injector. Mechanical systems and signal processing, volume 93, 397-414.
19. Jung I., Jin J., So H., Nam C. (2013). An advanced method for developing combustion noise through the analysis of diesel combustion. SAE Technical Paper 2013-01-1901.
20. Andersson I., McKelvey T., Larsson M. (2009). Combustion parameters estimation and control using vibration signal, application to the diesel HCCI engine. Proceedings of the IEEE conference on decision and control.
21. He Z., Xie W., Zhang G., Hong Z., Zhang J. (2014). Piston dynamic characteristics analyses based on FEM method part I, effected by piston skirt parameters. Advances in engineering software, vol 75, 68–85.
22. Dolatabadi та інші. (2015). On identification of piston slap events in internal combustion engines using dynamic analysis. Mechanical Systems and signal processing, vol 58-59, 308-324.
23. Mohd Ripin Z., Chong Tan Y. (2013). Analysis of piston secondary motion. Journal of sound and vibration, vol 332, 5162–5176.
24. Justin F., Gary M. (2016). Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains. Mechanical systems and signal processing, volume 72-73, 316-327.
25. Narayan S. (2014). A review of diesel engine acoustics. FME Transactions, vol. 42, No. 2, 150-154.
26. Narayan S. (2015). Correlation between in cylinder pressure and noise emissions from engines. Journal of kones power train and transport, vol. 22, No. 1, 243-254.
27. Mahroogi F., Narayan S., Gupta V. (2018). Acoustic transfer function in gasoline engines. International journal of vehicle noise and vibration, vol. 14, No. 3, 270-280.

REFERENCES

1. Kaisan M.U., Yusuf L.O., Ibrahim U., Narayan S. (2020). Effects of propanol and camphor blended with gasoline fuel on the performance and emissions of a spark ignition engine. ACS Omega, vol. 5, No.41 26454–26462.
2. Sheng G. (2012). Vehicle noise sound vibration and sound quality. Warrendale Pennsylvania USA, ISBN- 978-0-7680-3484-4.
3. Hambric et al. (2016). Engineering vibroacoustic analysis, methods and applications. ISBN: 978-1-119-95344-9.
4. Nuawi et al. (2013). Time domain analysis method of the impulse vibro-acoustic signal for fatigue strength characterization of metallic material. Procedia engineering volume 66 539-548.
5. Delvecchio S., Bonfiglio P., Pompil F. (2018). Vibro-acoustic condition monitoring of internal combustion engines, a critical review of existing techniques, mechanical systems and signal processing. Volume 99-661-683.

6. Philippe D. (2006). A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 119 1463
7. Creixell M. (2018). Computational reduction techniques for numerical vibro-acoustic analysis of hearing aids. Technical University of Denmark, department of electrical engineering.
8. Aymerich et al. (2010). Experimental study of impact-damage detection in composite laminates using a cross-modulation vibro-acoustic technique. Volume 9, issue 6, 541-553.
9. Trochidis et al. (2014) Analysis of vibroacoustic modulations for crack detection, a time-frequency approach based on Zhao-Atlas-Marks distribution, shock and vibration. Volume article id 102157, 8 pages, <https://doi.org/10.1155/2014/102157>.
10. Urban M.W., Alizad A., Aquino W., Greenleaf J.F., Fatemi M. (2011). A review of vibro-acoustography and its applications in medicine, current medical imaging. Volume 7, issue 4, 350-359.
11. Jun J. (2017). Analysis of load effect on nonlinear vibro-acoustic modulation used in on-line monitoring of fatigue cracks, smart materials and structures. Volume 26, number 9.
12. Ahmaida, Anwar M. (2018). Condition monitoring and fault diagnosis of a multi-stage gear transmission using vibro-acoustic signals. Doctoral thesis, University of Huddersfield.
13. Yue W., Di W., Lei W., Xiaojun W. (2018). Statistical energy analysis for vibro-acoustic coupled system with fuzzy parameters. Engineering computations, volume 35, issue 2, 565-579.
14. Jarosław G. et al. (2019). Use of cutting force and vibro-acoustic signals in tool wear monitoring based on multiple regression techniques for compreg milling. Bioresources, vol.14.
15. Hipol, Philip J. (1989). Finite element prediction of vibro-acoustic environments. SAE transactions, volume 98, 1881–1889.
16. Mohanty et al. (2015). User identification of keystroke biometric patterns with the cognitive RAM weightless neural net, advances in machine learning and signal processing. Proceedings of MALSIP, springer international.
17. Yong C., Juan T., Shaobo J., Minli H. (2012). Combustion timing determination based on vibration velocity in HCCI engines. Mechanism and machine theory, volume 58, 20-28.
18. Brian D., James H. (2017). Acoustic emission characteristics of a single cylinder diesel generator at various loads and with a failing injector. Mechanical systems and signal processing, volume 93, 397-414.
19. Jung I., Jin J., So H., Nam C. (2013). An advanced method for developing combustion noise through the analysis of diesel combustion. SAE Technical Paper 2013-01-1901.
20. Andersson I., McKelvey T., Larsson M. (2009). Combustion parameters estimation and control using vibration signal, application to the diesel HCCI engine. Proceedings of the IEEE conference on decision and control.
21. He Z., Xie W., Zhang G., Hong Z., Zhang J. (2014). Piston dynamic characteristics analyses based on FEM method part I, affected by piston skirt parameters. Advances in engineering software, vol 75, 68–85.
22. Dolatabadi et al. (2015). On identification of piston slap events in internal combustion engines using dynamic analysis. Mechanical Systems and signal processing, vol 58-59, 308-324.
23. Mohd Ripin Z., Chong Tan Y. (2013). Analysis of piston secondary motion. Journal of sound and vibration, vol 332, 5162–5176.
24. Justin F., Gary M. (2016). Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains. Mechanical systems and signal processing, volume 72-73, 316-327.
25. Narayan S. (2014). A review of diesel engine acoustics. FME Transactions, vol. 42, No. 2, 150-154.
26. Narayan S. (2015). Correlation between in cylinder pressure and noise emissions from engines. Journal of kones power train and transport, vol. 22, No. 1, 243-254.
27. Mahroogi F., Narayan S., Gupta V. (2018). Acoustic transfer function in gasoline engines. International journal of vehicle noise and vibration, vol. 14, No. 3, 270-280.

***V. Bilichenko, D. Matvijchuk* Review of modern vibroacoustic noise control methods for diesel engines with the aim of their further use in engine operation simulation.**

This article examines the potential use of various vibroacoustic signals for fault detection in parametric diagnostics of internal combustion engines (ICE). A review of previous research indicates that most studies focus on identifying the type of fault but do not determine the root cause of the malfunction. Moreover, they do not provide a comprehensive description of the physical mechanisms responsible for noise and vibration generation during the diagnostic process.

This paper presents a brief description of the sound and vibration generation mechanisms that occur directly during the engine's operation. These mechanisms, in turn, can be used as key parameters for diagnostics and assessing the technical condition of both individual components and the engine as a whole. A review of modern fault detection and diagnostic methods based on the vibroacoustic approach is provided. These methods analyze parameters such as noise and vibration, which are among the key indicators for this technique and yield more accurate and objective results compared to other widely accepted diagnostic methods.

The study describes various types of faults that can be detected using the vibroacoustic method and their direct impact on ICE performance. Given the need for rapid identification of fault type and nature, the data presented in this paper can serve as a basis for developing models, establishing necessary input parameters, and further simulating engine operation in the Ansys CAE environment. The mathematical analysis methods provided in the study define key parameters influencing diagnostic accuracy and, consequently, the effectiveness of defect detection, regardless of engine type, fuel type, or the presence of electrical components in the basic engine control system. This makes the proposed approach a universal and effective tool for solving diagnostic challenges.

Considering the wide variety of control systems and degrees of electrification in ICEs, the universality of the proposed method simplifies and addresses numerous technical issues. The analysis of noise and vibration conducted in this study plays a crucial role in determining the root cause of various faults. Due to technological clearances in component couplings, cyclic load variations in direction and application point, imbalance, and the lack of compensation for certain mechanical components, ICE components inherently generate noise and vibrations. Therefore, it is essential to identify the sources of these vibrations to prevent failures of individual components and the system as a whole.

Keywords: Diesel engine, modal analysis, engine acoustics, signal processing, diagnostics, simulation, durability, CAE systems.

БІЛІЧЕНКО Віктор Вікторович, д-р техн. наук, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет e-mail: bilichenko.v@gmail.com;

МАТВІЙЧУК Дмитро Миколайович — аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет e-mail: ndirir95@gmail.com.

Viktor BILICHENKO — Doctor of Technical Sciences , Professor of Chair of Automobiles and Transportation management, Vinnytsia National Technical University e-mail: bilichenko.v@gmail.com

Dmytro MATVIJCHUK — Postgraduate Student the Chair of Automobiles and Transportation Management , Vinnytsia National Technical University e-mail: ndirir95@gmail.com

DOI 10.36910/automash.v1i24.1718

Виноградов М.С.¹, Макарова Т.В.², Мастепан М.А.¹, Савенок Д.В.¹¹Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Івано-Франківськ, Україна²Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ ХОНІНГУВАННЯ СИЛІКАТНИМИ БРУСКАМИ НА ПАРАМЕТР ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА

Важлива роль у вирішенні завдань технологічного забезпечення зносостійкості поверхонь деталей автомобільного двигуна належить фінішним методам абразивно-алмазної обробки, одним з методів яких є хонінгування. Тому у теперішній час продовжується розробка нових, більш досконалих конструкцій інструментів (хонінгувальних головок, абразивних брусків, з більш привабливими характеристиками), що дозволить значно покращити якість поверхонь деталей і підвищити їх ресурс та експлуатаційні характеристики. Використання новітніх абразивних матеріалів робить хонінгування незмінним процесом у машинобудуванні, особливо у виробництві автомобільних двигунів.

В роботі наведено результати дослідження впливу тривалості процесу хонінгування, твердості і зернистості абразиву на параметр шорсткості поверхні гільзи циліндрів автомобільного двигуна.

Встановлено, що при збільшенні часу хонінгування якість поверхні (R_a) покращується як після обробки алмазними, абразивними так і силікатними брусками. Стабілізація формування остаточної шорсткості поверхні гільзи циліндрів відбувається при хонінгуванні на протязі 2,0 хв. Збільшення часу хонінгування силікатними брусками не впливає на якість поверхні і складає $R_a = 0,12$ мкм.

Відзначено, що висока якість поверхні після обробки силікатними брусками обумовлена утворенням в процесі хонінгування аморфного кремнезему (SiO_2), який під дією абразивних зерен потрапляє у западини оброблюваної поверхні та зчіпляється з поверхнею і таким чином оброблювана поверхня насичується оксидом кремнію.

Встановлено, що при збільшенні часу хонінгування як алмазними, абразивними так і силікатними брусками знімання металу збільшується.

Встановлено, що знімання металу після обробки силікатними брусками в 1,7-2 рази менше ніж після хонінгування алмазними та абразивними брусками.

Запропоновано для чистового хонінгування гільз циліндрів автомобільних двигунів використовувати силікатні бруски з абразивом карбід кремнію зеленого зернистістю 40/28.

Запропоновано призначати припуск на діаметр при чистовому хонінгуванні силікатними хонінгувальними брусками з абразивом карбід кремнію зеленого зернистістю 40/28 у межах 0,01-0,015 мм.

Ключові слова: автомобільний двигун, гільза циліндрів, хонінгування, шорсткість поверхні, силікатний брусок, алмазний брусок, твердість абразиву, зернистість, аморфний кремнезем.

ВСТУП

Підвищення і забезпечення надійності засобів автомобільного транспорту є однією з найважливіших передумов їх ефективного використання. Основна властивість, яка характеризує надійність засобів автомобільного транспорту – довговічність, визначається показниками: термін служби і ресурс. На даний момент ряд двигунів автомобільного транспорту, що експлуатуються в різних умовах, мають недостатній термін служби, що призводить до величезних збитків [1]. У зв'язку з цим пошук нових нестандартних технологічних рішень підвищення зносостійкості поверхонь деталей автомобільних двигунів, за рахунок покращення фізико-механічних властивостей робочих поверхонь є актуальною задачею.

Важлива роль у вирішенні завдань технологічного забезпечення зносостійкості поверхонь деталей автомобільних двигунів належить фінішним методам абразивно-алмазної обробки, одним з методів, яких є хонінгування. Хонінгування – це високоточна обробка поверхонь деталей за допомогою абразивного інструменту (хонінгувальної головки) для досягнення необхідної шорсткості, форми та розміру. Технологічні фактори, що впливають на процес хонінгування, можна поділити на кілька основних груп:

1. Матеріал оброблюваної деталі:

-твердість: чим твердіший матеріал, тим більше навантаження та часу потребує хонінгування.

Наприклад, сталь, чавун або сплави мають різні вимоги до процесу;

-тип матеріалу: леговані сталі та сплави можуть вимагати спеціальних ріжучих матеріалів і технологічних режимів.

2. Матеріал хонінгувального інструменту:

-абразив: використовуються різні типи абразивів (корунд, карбід кремнію, алмазні або кубічно-борні нітриди) в залежності від типу матеріалу деталі;

-твердість і зернистість абразиву визначають швидкість зняття матеріалу й досягнення бажаного результату.

3. Технологічні параметри процесу:

-швидкість різання: вибір швидкості залежить від матеріалу деталі та інструменту. Занадто висока швидкість може призвести до перегріву, зносу інструменту та втрати точності;

-тиск хонінгувальних каменів: оптимальний тиск важливий для забезпечення рівномірного зняття матеріалу та уникнення деформацій;

-кількість ходів і тривалість процесу: від кількості повторних проходів залежить якість обробки, а також досягнення потрібних параметрів точності та шорсткості поверхні.

4. Застосування охолоджуючо-мастильних рідин:

-тип рідини: масла або емульсії використовуються для охолодження зони обробки, зменшення тертя і виведення стружки;

-подавання рідини: якісна подача охолоджувальних рідин важлива для уникнення перегріву інструменту та деталі.

Ці фактори впливають на результат процесу, тому важливо їх враховувати для досягнення потрібної якості обробки.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналіз відомих публікацій показує, що для забезпечення необхідної шорсткості поверхні при чистовому хонінгуванні в межах $R_a = 0,14-0,16$ мкм, необхідно вибирати оптимальні параметри хонінгування, а також створювати належний мікрорельєф поверхні, необхідний для утримання на поверхні гільз циліндра шару масла і зменшення зношування в процесі роботи. Рекомендується оптимальне співвідношення колової та осьової швидкостей в межах 2-4, що забезпечує кут перетину маслоутримуючих рисок α в діапазоні $45^\circ-60^\circ$ [2].

В роботі [3] встановлено, що режими різання при хонінгуванні суттєво впливають як на параметр шорсткості поверхні R_a , так і на продуктивність процесу абразивного хонінгування. Доведено, що найбільший вплив на параметр R_a мають колова і осьова швидкості руху головки і питомий тиск брусків на поверхню оброблення. Такі технологічні фактори, як кількість брусків у хоні, густина та склад мастильно-охолоджуючої рідини також мають вплив на процес абразивного хонінгування, але їх значення невисокі у порівнянні з наведеними основними режимами різання.

В роботі [4] розглянуті параметрами процесу хонінгування: колова і осьова швидкості руху головки, величина радіальної подачі брусків (питомий тиск). Оптимізовано режим хонінгування силікатними брусками. Встановлено, що після обробки алмазними, абразивними та силікатними брусками якість поверхні покращується при збільшенні колової швидкості і погіршується при збільшенні осьової швидкості. Відзначено, що після обробки алмазними, абразивними та силікатними брусками знімання металу збільшується при збільшенні осьової швидкості брусків і зменшується при збільшенні колової швидкості. Підтверджено, що після обробки алмазними брусками знімання металу збільшується і якість поверхні погіршується при збільшенні контактного тиску брусків. і покращується після обробки абразивними та силікатними брусками. Після хонінгування абразивними та силікатними брусками знімання металу плавно зменшується при збільшенні контактного тиску брусків.

Таким чином, загальними проблемами є підвищення ресурсу і експлуатаційних характеристик деталей автомобільного двигуна та їх якості поверхні за рахунок оптимізації технологічних факторів хонінгування і розробки нових, більш досконалих складів абразивних брусків, з більш привабливими характеристиками. Використання новітніх абразивних матеріалів робить хонінгування незмінним процесом у машинобудуванні, особливо у виробництві автомобільних двигунів.

Оптимізація технологічних параметрів хонінгування, таких як швидкість руху головки, вибір матеріалу та зернистості абразивних брусків, а також кінематичні характеристики процесу, є ключовими для досягнення високої якості обробленої поверхні деталей автомобільних двигунів. Подальші дослідження в цій галузі сприятимуть удосконаленню технологічних процесів та підвищенню експлуатаційних характеристик двигунів.

Враховуючи вище наведене, виникає необхідність дослідити вплив технологічних факторів хонінгування силікатними брусками на параметр шорсткості обробленої поверхні.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Метою дослідження є моделювання впливу технологічних факторів хонінгування силікатними брусками на параметр шорсткості поверхні деталей автомобільного двигуна. Задачами дослідження є наступні: обрати та підготувати гільзи циліндрів автомобільного двигуна; запропонувати режим обробки поверхні силікатними брусками; визначити вплив часу хонінгування на якість оброблюваної поверхні; визначити вплив зернистості абразиву на якість оброблюваної поверхні; визначити вплив твердості абразиву на якість оброблюваної поверхні.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі, яка пропонується проведено дослідження впливу тривалості процесу хонінгування, твердості і зернистості абразиву на параметр шорсткості обробленої поверхні.

Досліди проводили на хонінгувальному верстаті моделі 3Г833, який призначений до остаточного оздоблення отворів у гільзах двигунів внутрішнього згоряння та інших деталях. Механізми верстата здійснюють за циклом одночасний зворотно-поступальний і обертальний рухи хонінгувальної головки і радіальну подачу брусків, що забезпечує збільшення по діаметру робочої частини інструменту в процесі обробки. Конструкція хонінгувальної головки являє собою циліндр, у якому вмонтовані хонінгувальні бруски, що переміщуються з точністю до 0,01 мм. Бруски можуть бути як абразивними, так і алмазними.

Для проведення дослідів були відібрані гільзи циліндрів автомобільного двигуна, які виготовлені із сірого легованого чавуну твердістю HB 217-250 (ДСТУ 8851:2019). Підготовка гільз для дослідів проводилася у два етапи: розточка і чорнове хонінгування алмазними брусками на металополімерній зв'язці BC12 зернистістю 125/100 (АБХ 125×12×6, 125/100, BC12) з вихідною шорсткістю поверхні гільз $R_a=0,8$ мкм [4].

В роботі [4] запропоновано режим обробки силікатними брусками для досягнення мінімального значення параметра шорсткості (R_a) оброблюваної поверхні. Приймаючи це до уваги, дослідження проводили на наступному режимі: тиск хонінгувального бруска на оброблювану заготовку 0,25 МПа, колова швидкість хонінгувальної головки – 0,5 м/с (30 м/хв), осьова швидкість хонінгувальної головки – 0,3 м/с (18 м/хв).

При визначенні впливу часу хонінгування на якість оброблюваної поверхні (R_a) час обробки змінювався від 0,5 хв. до 3,0 хв. з інтервалом 0,5 хв. У якості брусків для чистового хонінгування були виготовлені силікатні бруски СБХ 100×8×7 з абразивних мікропорошків карбіду кремнію зеленого марки 63С зернистістю М40/28. Для порівняння працездатності силікатних брусків використали алмазні бруски, які виготовлені на полімерній зв'язці В2-04 з мікропорошків синтетичного алмазу марки АСМ зернистістю 40/28 (АБХ 100×8×5, 40/28, В2-04) та абразивні бруски хонінгувальні на основі карбіду кремнію зеленого марки 63С зернистістю М40/28 (АБХ 100×8×7, КЗ-40), що пропонується для чистового хонінгування [5].

При визначенні впливу зернистості абразиву на якість оброблюваної поверхні (R_a) зернистість абразиву змінювалася від 28 мкм до 80 мкм. Для чистового хонінгування були виготовлені силікатні бруски СБХ 100×8×7 з абразивних мікропорошків карбіду кремнію зеленого зернистістю 80/63, 63/50, 50/40, 40/28, 28/20. Для порівняння працездатності силікатних брусків використали алмазні бруски, які виготовлені на полімерній зв'язці В2-04 з мікропорошків синтетичного алмазу марки АСМ (АБХ 100×8×5, В2-04) зернистістю 80/63, 63/50, 50/40, 40/28, 28/20 та абразивні бруски хонінгувальні на основі карбіду кремнію зеленого марки 63С зернистістю 80/63, 63/50, 50/40, 40/28, 28/20.

При визначенні впливу твердості абразиву на якість оброблюваної поверхні (R_a) твердість абразиву змінювалася від 1500 кгс/мм² до 4500 кгс/мм². Для чистового хонінгування були виготовлені силікатні бруски СБХ 100×8×7 з абразивних мікропорошків електрокорунду (мікротвердість 1000-2200 кгс/мм²), карбіду кремнію зеленого (2850-3600 кгс/мм²), карбіду титану (2980-3300 кгс/мм²), карбіду бору (4000-5000 кгс/мм²) зернистістю 40/28. Для порівняння працездатності силікатних брусків використали алмазні бруски, які виготовлені на полімерній зв'язці В2-04 з мікропорошків синтетичного алмазу (8425-10000 кгс/мм²) марки АСМ (АБХ 100×8×5, В2-04) та абразивні бруски з абразивних мікропорошків електрокорунду (мікротвердість 1000-2200 кгс/мм²), карбіду кремнію зеленого (2850-3600 кгс/мм²), карбіду титану (2980-3300 кгс/мм²), карбіду бору (4000-5000 кгс/мм²) зернистістю 40/28.

Оцінка велася за якістю поверхні та зніманню металу. Дослідження шорсткості поверхні здійснювали за допомогою профілографа-профілометра моделі 201. Найкращою працездатністю мали ті бруски, після обробки яких зразки мали найменшу шорсткість.

Знімання металу визначали ваговим методом, тобто зважуванням на аналітичних терезах типу Sartorius CPA 224S (рис. 1) з точністю $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ г (клас точності згідно ДСТУ EN 45501-1) до та після випробувань. Після обробки зразки промивалися водою і ацетоном [6].

На рис. 2-4 наведено результати досліджень. Аналізуючи рис. 2, можна відмітити, що при збільшенні часу хонінгування якість поверхні (R_a) покращується після обробки алмазними, абразивними та силікатними брусками. При хонінгуванні від 0,5 хв. до 3 хв. алмазними брусками якість поверхні покращується з $R_a = 0,40$ мкм до $R_a = 0,32$ мкм; абразивними брусками – з $R_a = 0,44$ мкм до $R_a = 0,34$ мкм; силікатними брусками – з $R_a = 0,20$ мкм до $R_a = 0,12$ мкм.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд терез типу Sartorius CPA 224S

При обробці алмазними і абразивними брусками стабілізація формування остаточної шорсткості поверхні гільзи циліндрів починається з 2,5 хв. Автори роботи [7] стверджують, що стабілізація процесу обумовлено різальними властивостями абразивних хонінгувальних брусків, внаслідок чого через деякий час (t , с.) відбувається припрацювання інструментів з поверхнею оброблення.

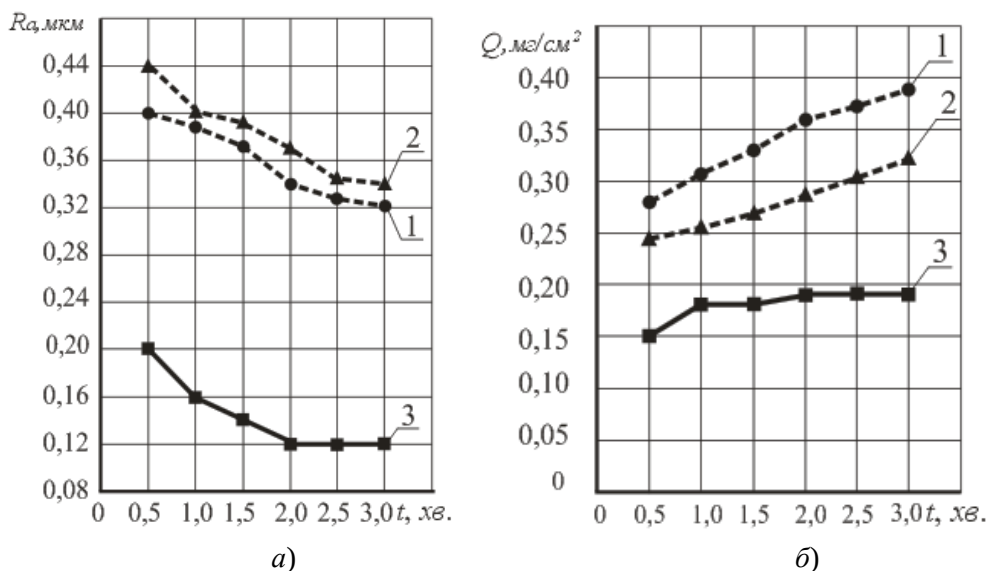
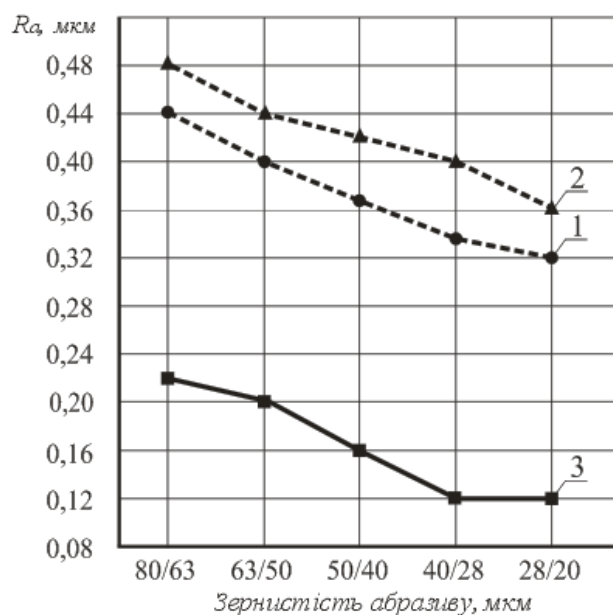


Рисунок 2 – Зміна шорсткості поверхні (R_a , мкм) (а) та значення знімання металу (Q , мг/см²) (б) при хонінгуванні гільз циліндрів із сірого легованого чавуну ІЧГ-33М твердістю НВ 217-250 від часу (t , хв.) після обробки брусками: 1 – алмазними; 2 – абразивними; 3 – силікатними

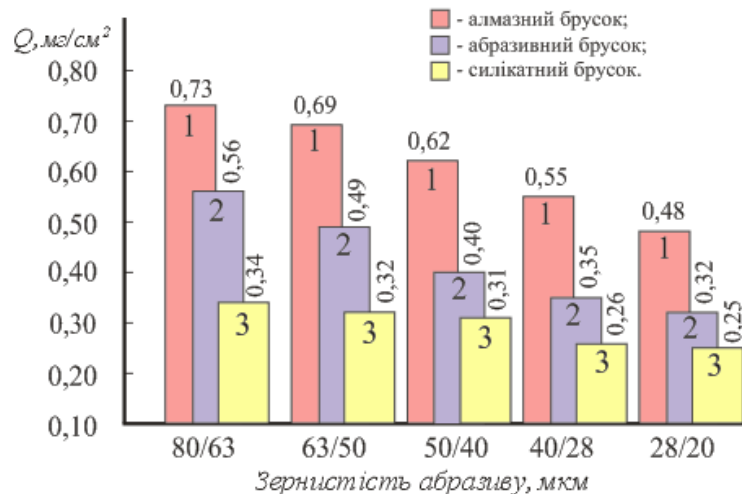
Крім цього, можна відмітити, що під час обробки силікатними брусками протягом 2,0, 2,5 та 3,0 хв. шорсткість поверхні дорівнює $R_a = 0,12$ мкм. Можна стверджувати, що стабілізація формування остаточної шорсткості поверхні гільзи циліндрів відбувається при хонінгуванні на

протязі 2,0 хв. Збільшення часу хонінгування силікатними брусками не впливає на якість поверхні і цього часу достатньо для завершення операції.

Результати дослідження, які наведені на рис. 1, б показують, що при збільшенні часу хонінгування алмазними, абразивними та силікатними брусками знімання металу (Q , мг/см^2) збільшується. При хонінгуванні алмазними брусками протягом 0,5 хв. знімання металу $Q = 0,28 \text{ мг/см}^2$ і при збільшенні часу обробки до 3,0 хв. знімання металу зростає до $Q = 0,39 \text{ мг/см}^2$. При хонінгуванні абразивними брусками протягом 0,5 хв. знімання металу $Q = 0,24 \text{ мг/см}^2$ і при збільшенні часу обробки до 3,0 хв. знімання металу зростає до $Q = 0,32 \text{ мг/см}^2$.



а)



б)

Рисунок 3 – Зміна шорсткості поверхні (R_a , мкм) (а) та значення знімання металу (Q , мг/см^2) (б) при хонінгуванні гільз циліндрів із сірого легovanого чавуну ІЧГ-33М (HB 217-250) від зернистості абразиву (мкм) після обробки брусками: 1 – алмазними; 2 – абразивними; 3 – силікатними

При хонінгуванні силікатними брусками $t = 0,5$ хв. знімання металу складає $Q = 0,15 \text{ мг/см}^2$ і при $t = 3,0$ хв. знімання металу становить $Q = 0,19 \text{ мг/см}^2$. Можна зробити висновок, що після обробки силікатними брусками знімання металу в 1,7-2 рази менше ніж після хонінгування алмазними та абразивними брусками. Цей висновок допоможе у визначенні припусків на хонінгування силікатними брусками.

Аналізуючи рис. 2, а, відзначаємо, що після обробки гільз циліндрів алмазними брусками при зменшенні зернистості абразиву шорсткість поверхні зменшується з $R_a = 0,44 \text{ мкм}$ (зернистість абразиву 80/63) до $R_a = 0,32 \text{ мкм}$ (зернистість абразиву 28/20). При хонінгуванні абразивними

брусками шорсткість поверхні зменшується з $R_a = 0,48$ мкм до $R_a = 0,36$ мкм. Після обробки гільз силікатними брусками шорсткість поверхні зменшується з $R_a = 0,22$ мкм (зернистість абразиву 80/63) до $R_a = 0,12$ мкм (зернистість абразиву 40/28) (рис. 2, а, крива 3). Після хонінгування силікатними брусками з абразивом 28/20 шорсткість поверхні не змінюється і складає $R_a = 0,12$ мкм. Низьке значення параметру шероховатості обробленої поверхні відбувається за рахунок насичення обробленої поверхні оксидом кремнію (SiO_2), який потрапляє у западини мікронерівностей і з'єднується з поверхнею. Застосування силікатних хонінгувальних брусків до чистового

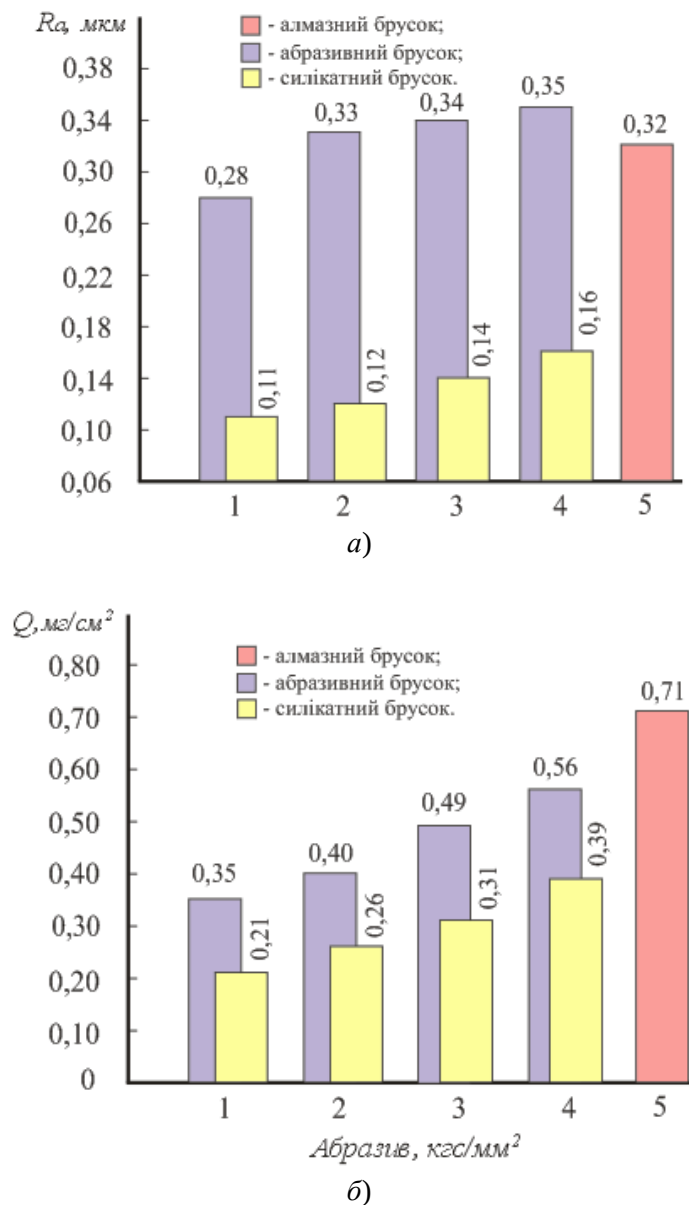


Рисунок 4 – Зміна шорсткості поверхні (R_a , мкм) (а) та значення знімання металу (Q , мг/см²) (б) при хонінгуванні гільз циліндрів із сірого легованого чавуну ІЧГ-33М (НВ 217-250) після обробки брусками з абразивом мікротвердістю: 1 – електрокорунд (1000-2200 кгс/мм²); 2 – карбід кремнію зелений (2850-3600 кгс/мм²); 3 – карбід титану (2980-3300 кгс/мм²); 4 – карбід бору (4000-5000 кгс/мм²); 5 – алмаз синтетичний (8425-10000 кгс/мм²)

хонінгування дозволить змінити структуру поверхневого шару обробленої поверхні, що узгоджується з роботою [8].

На підставі вище наведених результатів відзначаємо, що нема сенсу використовувати абразив зернистістю 28/20 для виготовлення силікатних хонінгувальних брусків. Пропонуємо для чистового хонінгування гільз циліндрів автомобільних двигунів використовувати силікатні бруски з абразивом карбиду кремнію зеленого зернистістю 40/28.

Аналіз залежності знімання металу (Q , мг/см²) від зернистості абразиву (рис. 2, б), показує, що при зменшенні зернистості абразиву зменшується значення знімання металу. При зменшенні

зернистості абразиву алмазного бруска від 80/63 до 28/20 знімання металу (Q) зменшується від $Q = 0,73 \text{ мг/см}^2$ до $Q = 0,48 \text{ мг/см}^2$, абразивного бруска – від $Q = 0,56 \text{ мг/см}^2$ до $Q = 0,32 \text{ мг/см}^2$, силікатного бруска – знімання металу (Q) зменшується від $Q = 0,34 \text{ мг/см}^2$ до $Q = 0,25 \text{ мг/см}^2$. Таким чином можна відмітити, що при хонінгуванні чавунних гільз циліндрів силікатними брусками знімання металу в 1,7-2 рази менше ніж після обробки алмазними брусками.

Аналізуючи рис. 3, а видно, що при хонінгуванні гільз циліндрів із сірого легованого чавуну ІЧГ-33М твердістю НВ 217-250 параметр R_a шорсткості поверхні збільшується при збільшенні мікротвердості абразиву. Найменше значення шорсткості $R_a = 0,11$ (рис. 3, а) при обробці силікатними хонінгувальними брусками спостерігається з абразивом електрокорунду (мікротвердість 1000-2200 кгс/мм^2) та карбіду кремнію зеленого (мікротвердість 2850-3600 кгс/мм^2) – $R_a = 0,12 \text{ мкм}$. Низьке значення R_a параметру шерохватості обробленої поверхні відбувається за рахунок насичення оксидом кремнію (SiO_2).

Найбільше значення R_a спостерігаються при хонінгуванні силікатними брусками з абразивом карбіду бора (мікротвердість 4000-5000 кгс/мм^2) і дорівнює $R_a = 0,18 \text{ мкм}$. При хонінгуванні алмазними брусками (мікротвердість 8425-10000 кгс/мм^2) параметр R_a шорсткості обробленої поверхні становить $R_a = 0,22 \text{ мкм}$. Враховуючи результати досліджень (рис. 3, а) і рекомендації [5], пропонуємо чистове хонінгування виконувати силікатними брусками з абразивом карбіду кремнію зеленого. Його зерна мають найгострішу форму (мінімальний кут загострення при вершині зерна) та найменший (у порівнянні з електрокорундовими та монокорундовими зернами) радіус округлення одиничного зерна. Саме ці фактори і є тими найвпливовішими серед інших, які безпосередньо поліпшують умови технологічного процесу різання матеріалів і зрізання стружки [7].

Аналіз рис. 3, б показав, що при збільшенні мікротвердості абразивних зерен знімання металу (Q , мг/см^2) збільшується і найбільше значення Q спостерігається при хонінгуванні гільз циліндрів силікатними хонінгувальними брусками з абразивом карбіду бора (мікротвердість 4000-5000 кгс/мм^2) і дорівнює $Q = 0,39 \text{ мг/см}^2$. Найменші значення $Q = 0,21 \text{ мг/см}^2$ спостерігаються при обробці силікатними хонінгувальними брусками з абразивом електрокорунду (мікротвердість 1000-2200 кгс/мм^2). При хонінгуванні силікатними хонінгувальними брусками з абразивом карбіду кремнію зеленого (мікротвердість 2850-3600 кгс/мм^2) та карбіду титану (мікротвердість 2980-3300 кгс/мм^2) $Q = 0,26 \text{ мг/см}^2$ та $Q = 0,31 \text{ мг/см}^2$, відповідно.

Порівнюючи значення Q при обробці силікатними брусками і алмазними хонінгувальними брусками, відзначаємо, що найбільше значення Q спостерігається у алмазних брусків – $Q = 0,55 \text{ мг/см}^2$. Це відбувається, на нашу думку, за рахунок високої твердості алмазу (8425-10000 кгс/мм^2). Таким чином можна стверджувати, що знімання металу при хонінгуванні силікатними брусками в 1,7-2 рази менше, ніж при обробці алмазними брусками. Ці результати враховуємо при призначенні припуску на чистову обробку силікатними брусками..

Відповідно роботи [4], припуск на діаметр при хонінгуванні алмазними брусками чавунних поверхонь (НВ 240) зернистістю 40/28 складає 0,02-0,03 мм . Оскільки знімання металу при хонінгуванні силікатними брусками в 1,7-2 рази менше, ніж при обробці алмазними брусками, тоді при чистовому хонінгуванні силікатними брусками з абразивом карбіду кремнію зеленого зернистістю 40/28 пропонуємо призначати припуск на обробку гільз циліндрів із сірого легованого чавуну твердістю НВ 217-250 у межах 0,01-0,015 мм .

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Результати дослідження дають можливість стверджувати, що збільшення часу хонінгування силікатними брусками не впливає на якість поверхні і складає $R_a = 0,12 \text{ мкм}$. На нашу думку, отримання високої якості поверхні гільзи циліндрів ($R_a = 0,12 \text{ мкм}$) формується в результаті взаємодії двох складових: водної мастильної охолоджувальної рідини, яка необхідна для охолодження деталі та виведення стружки з зони різання, і силікатної композиції, яка є одним з компонентів силікатного бруска. Під час хонінгування на поверхні, яка обробляється, відбуваються хімічні зміни в результаті чого утворюється оксид кремнію (SiO_2). За рахунок колового і осьового руху хонінгувальної головки та контактного тиску брусків на поверхню гільзи циліндрів відбувається зрізання абразивними зернами найвищих вершин нерівностей. В зоні контакту абразивних зерен і вершин нерівностей відбувається підвищення температури, а оскільки навколо абразиву знаходиться SiO_2 , то при попаданні останнього в зону зіткнення відбувається утворення аморфного кремнезему (SiO_2) [8]. Під дією абразивних зерен SiO_2 потрапляє у западини оброблюваної поверхні та зчіпляється з поверхнею. При багаторазовому впливі абразиву відбувається щільне «пакування» SiO_2 глибоких западин нерівностей і поверхня насичується оксидом кремнію, що дозволяє отримати високу якість поверхні.

Аналіз впливу технологічних факторів хонінгування силікатними брусками дає можливість призначати припуск на діаметр при чистовому хонінгуванні силікатними хонінгувальними брусками з абразивом карбіду кремнію зеленого зернистістю 40/28 у межах 0,01-0,015 мм.

Отримані результати дослідження можуть сприятимуть удосконаленню технологічних процесів відновлення та покращення фізико-механічних властивостей робочих поверхонь деталей автомобільного двигуна.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що при збільшенні часу хонінгування якість поверхні (R_a) покращується як після обробки алмазними, абразивними так і силікатними брусками. Стабілізація формування остаточної шорсткості поверхні гільзи циліндрів відбувається при хонінгуванні на протязі 2,0 хв. Збільшення часу хонінгування силікатними брусками не впливає на якість поверхні і складає $R_a = 0,12$ мкм.

2. Відзначено, що висока якість поверхні після обробки силікатними брусками обумовлена утворенням в процесі хонінгування аморфного кремнезему (SiO_2), який під дією абразивних зерен потрапляє у западини оброблюваної поверхні та зчіплюється з поверхнею і таким чином оброблювана поверхня насичується оксидом кремнію.

3. Встановлено, що при збільшенні часу хонінгування як алмазними, абразивними так і силікатними брусками знімання металу збільшується.

4. Встановлено, що знімання металу після обробки силікатними брусками в 1,7-2 рази менше ніж після хонінгування алмазними та абразивними брусками.

5. Запропоновано для чистового хонінгування гільз циліндрів автомобільних двигунів використовувати силікатні бруски з абразивом карбіду кремнію зеленого зернистістю 40/28.

6. Запропоновано призначати припуск на діаметр при чистовому хонінгуванні силікатними хонінгувальними брусками з абразивом карбіду кремнію зеленого зернистістю 40/28 у межах 0,01-0,015 мм.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лузан С.О. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей: курс лекцій. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 118 с.

2. Лапенко Г.О., Лапенко Т.Г., Кузьменко О.І. Оптимізація технологічного процесу хонінгування блоків циліндрів автотракторних двигунів алмазними брусками. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [Visnyk KhNTUSH_199_2019_28.pdf \(btu.kharkov.ua\)](https://visnyk.khntush.199-2019-28.pdf)

3. Гавриш А. П., Киричок П. О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Вплив технологічних факторів хонінгування на параметри шорсткості і точності поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин. *Прогресивні технології і системи машинобудування*. Вип. 1, 2 (46), с. 56-64. 2013.

4. Дослідження впливу параметрів процесу хонінгування силікатними брусками на якість обробленої поверхні / Виноградов М.С., Макарова Т.В., Мастепан М. А., Савенок Д. В. *Вісник машинобудування та транспорту*, №1(19), С. 3-10. 2024.

5. Бруски хонінгувальні. URL : [Бруски хонінгувальні в Києві від коМПанії "ТЕХДІАМАНТ". \(techdiamond.kiev.ua\)](https://techdiamond.kiev.ua) (дата звернення: 12.01.2025).

6. Виноградов М.С., Захаров В.О. Дослідження впливу зернистості абразиву силікатних брусків на якість обробленої поверхні. *Збірник наукових праць Донбаської національної академії будівництва і архітектури*, №4 (31), С. 4-8. 2023.

7. Вплив технологічних факторів хонінгування на параметри шорсткості і точності поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин / Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. *Прогресивні технології і системи машинобудування*. Вип. 1, 2 (46), С. 56-64. 2013.

8. Виноградов М.С., Височин Т.О. Експериментальне дослідження зносостійкості поверхонь оброблених силікатними брусками. *Збірник наукових праць Донбаської національної академії будівництва і архітектури*, №4 (31), С. 9-15. 2023.

REFERENCES

1. Luzan S.O. Obgruntuvannia ta vdoskonalennia tekhnolohii vidnovlennia detalei: kurs lektsii. Kharkiv: NTU «KhPI», 2023. 118 s.

2. Lapenko H. O., Lapenko T. H., Kuzmenko O. I. Optymizatsiia tekhnolohichnoho protsesu khoninhuvannia blokiv tsylindriv avtotraktornykh dyvahuniv almaznymy bruskami. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: [Visnyk KhNTUSH_199_2019_28.pdf \(btu.kharkov.ua\)](https://visnyk.khntush.199-2019-28.pdf)

3. Havrysh A. P., Kyrychok P. O., Roik T.A., Vitsiuk Yu.Iu. Vplyv tekhnolohichnykh faktoriv khoninhuvannia na parametry shorstkosti i tochnosti poverkhon kompozytnykh pidshypnykiv kovzannia polihrafichnykh mashyn. Prohresyvni tekhnolohii i systemy mashynobuduvannia. Vyp. 1, 2 (46), s. 56-64. 2013.

4. Doslidzhennia vplyvu parametriv protsesu khoninhuvannia sylikatnymi bruskami na yakist obroblenoi poverkhni / Vynohradov M.S., Makarova T.V., Mastepan M. A., Savenok D. V. Visnyk mashynobuduvannia ta transportu, №1(19), S. 3-10. 2024.

5. Brusky khoninhuvalni. URL : Brusky khoninhuvalni v Kyievi vid koMPanii "TEKhDIAMANT". (techdiamond.kiev.ua) (data zvernennia: 12.01.2025).

6. Vynohradov M.S., Zakharov V.O. Doslidzhennia vplyvu zernystosti abrazyvu sylikatnykh bruski na yakist obroblenoi poverkhni. Zbirnyk naukovykh prats Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva i arkhitektury, №4 (31), S. 4-8. 2023.

7. Vplyv tekhnolohichnykh faktoriv khoninhuvannia na parametry shorstkosti i tochnosti poverkhon kompozytnykh pidshypnykiv kovzannia polihrafichnykh mashyn / Havrysh A.P., Kyrychok P.O., Roik T.A., Vitsiuk Yu.Iu. Prohresyvni tekhnolohii i systemy mashynobuduvannia. Vyp. 1, 2 (46), S. 56-64. 2013.

8. Vynohradov M.S., Vysochyn T.O. Eksperymentalne doslidzhennia znosostiosti poverkhon obroblynykh sylikatnymi bruskami. Zbirnyk naukovykh prats Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva i arkhitektury, №4 (31), S. 9-15. 2023.

M. Vynohradov, T. Makarova, M. Mastepan, D. Savenok Study of the influence of technological factors of honing with silicate bars on the surface roughness of automobile engine parts.

Finishing methods of abrasive diamond processing, one of which is honing, play an important role in solving the problems of technological support of wear resistance of the surfaces of automobile engine parts. Therefore, the development of new, more advanced tool designs (honing heads, abrasive bars with more attractive characteristics) is currently underway, which will significantly improve the quality of the surfaces of parts and increase their service life and performance. The use of the latest abrasive materials makes honing an unchanging process in mechanical engineering, especially in the production of automotive engines.

This paper presents the results of studying the effect of the honing process duration, abrasive hardness and grit on the surface roughness parameter of the cylinder liner of an automobile engine.

It has been established that with an increase in honing time, the surface quality (R_a) improves both after processing with diamond, abrasive, and silicate bars. Stabilization of the formation of the final surface roughness of the cylinder liner occurs when honing for 2.0 minutes. An increase in the honing time with silicate bars does not affect the surface quality and amounts to $R_a = 0.12 \mu\text{m}$.

It is noted that the high quality of the surface after honing with silicate bars is due to the formation of amorphous silica (SiO_2) during honing, which, under the action of abrasive grains, falls into the depressions of the treated surface and adheres to the surface, thus saturating the treated surface with silicon oxide.

It was found that with an increase in the honing time with both diamond, abrasive and silicate bars, metal removal increases.

It was found that the metal removal after honing with silicate stones is 1.7-2 times less than after honing with diamond and abrasive stones.

It is proposed to use silicate stones with a green silicon carbide abrasive with a grain size of 40/28 for the finishing honing of automobile engine cylinder liners.

It is proposed to assign a diameter allowance for finishing honing with silicate honing bars with a 40/28-grit green silicon carbide abrasive within 0.01-0.015 mm.

Keywords: automobile engine, cylinder liner, honing, surface roughness, silicate block, diamond block, abrasive hardness, grain size, amorphous silica.

ВИНОГРАДОВ Микола Семенович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, Донбаська національна академія будівництва і архітектури, e-mail: m.s.vynohradov@donnaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7896-4980>.

МАКАРОВА Тамара Володимирівна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tomamakarova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0669-8350>.

МАСТЕПАН Микола Антонович – кандидат технічних наук, доцент, виконуючий обов'язки завідувача кафедри автомобільного транспорту, Донбаська національна академія будівництва і архітектури, e-mail: m.a.mastepan@donnaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7389-2909>.

САВЕНОК Дмитро Валерійович – кандидат технічних наук, виконуючий обов'язки декана механічного факультету, Донбаська національна академія будівництва і архітектури, e-mail: <https://orcid.org/0000-0002-1703-2696>.

Mykola VYNOGRADOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Road Transport, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, e-mail: m.s.vynohradov@donnaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7896-4980>.

Tamara MAKAROVA – Cand. Sc. (Ec.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: tomamakarova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0669-8350>.

Mykola MASTEPAN - Ph. D., associate professor, head of the department of automobile transport, Donbas National Academy of Construction and Architecture, e-mail: mastepanma@gmail.com.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7389-2909>

Dmytro SAVENOK – Candidate of Technical Sciences, Acting Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, e-mail: <https://orcid.org/0000-0002-1703-2696>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1719

Волков В. П.¹, Онищук В.П.², Волкова Т.В.¹, Левчук М.А.¹
¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет
²Луцький національний технічний університет

ІНТЕГРАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО – ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ В ВІРТУАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті висвітлено розроблення та інтеграцію інформаційно-програмного комплексу «IdenMonDiaOperCon HNADU-16» у структуру віртуального автотранспортного підприємства, призначеного для дистанційного моніторингу, діагностування й прогнозування технічного стану транспортних засобів малого автопарку. Комплекс поєднує дані OBD-II, GPS-трекінгу та дорожньої обстановки, що надходять від мобільних модулів CarLife і Torque, у реляційній базі даних, структурованій за семантичним ключем «час надходження інформації». Морфологічний аналіз використано для синтезу архітектури системи, яка охоплює сім груп і шістьдесят інформаційних елементів; це забезпечує адаптивність комплексу до різних умов експлуатації. Під час польових випробувань на 200-кілометровому маршруті отримано криві витрати палива та середньої швидкості, що дали змогу визначити енергоефективні режими руху. Запропонований комплекс зменшує витрати палива на 8–10 %, скорочує час виявлення критичних відмов силового агрегату і дає можливість планувати технічне обслуговування за фактичним станом, що особливо важливо для приватних перевізників із парком 1–5 автомобілів. Наукова новизна роботи полягає в поєднанні віртуальної організаційної структури з мультиджерельними алгоритмами моніторингу, зосередженими на часовій компоненті, що забезпечує узгоджене злиття даних у реальному часі. Практичні результати можуть бути використані при створенні систем керування малих автопідприємств і впровадженні концепції інтелектуальних транспортних систем у міську логістику.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи, моніторинг, діагностика, телематика, база даних, OBD-II, віртуальне підприємство.

ВСТУП

Останнє десятиліття характеризується стрімкою цифровою трансформацією автотранспортної галузі: на зміну фрагментарним системам контролю технічного стану транспортних засобів (ТЗ) приходять комплексні рішення, що базуються на концепції інтелектуальних транспортних систем (ITS). Світові дослідження підтверджують, що поєднання телематики, бортової діагностики та хмарних сервісів дає змогу скоротити експлуатаційні витрати автопідприємств на 10–15 % і підвищити рівень безпеки перевезень. Проте більшість українських перевізників – це малі підприємства з парком 1–5 автомобілів, для яких високовартісні комерційні платформи залишаються недосяжними. Відсутність адаптивних інструментів моніторингу спричиняє несвоєчасне виявлення відмов силового агрегата, перевитрати палива та неможливість планувати технічне обслуговування за фактичним станом.

Актуальність проблеми посилюється вимогами до енергоефективності й екологічної безпеки транспорту, що закріплені у низці міжнародних директив та вітчизняних нормативів. Для малих автопідприємств критичними стають два взаємопов'язані чинники: підвищення вартості енергоносіїв і зростаюча конкуренція на ринку логістичних послуг. Сучасні наукові праці пропонують низку алгоритмічних та апаратних рішень для великих автопарків, однак питання масштабованості та гнучкого налаштування під потреби невеликих перевізників залишаються слабо дослідженими. Наявний розрив між науковими розробками й практичними потребами малого бізнесу зумовлює необхідність створення інформаційно-програмних комплексів (ІПК), які б інтегрували дані різних джерел (OBD-II, GPS, дорожня ситуація) та надавали користувачам інструменти для прийняття оперативних рішень.

Саме цим вимогам відповідає запропонований у роботі ІПК «IdenMonDiaOperCon HNADU-16», що реалізує принцип мультиджерельного моніторингу у віртуальному середовищі автотранспортного підприємства. Комплекс орієнтований на потреби малих перевізників, забезпечує віддалений збір і оброблення телематичних даних у режимі реального часу та підтримує функції діагностування, прогнозування і візуалізації параметрів технічного стану ТЗ. З огляду на вищезазначене, розробка та апробація такого комплексу становить значний науковий і практичний інтерес, адже сприяє підвищенню ефективності управління ресурсами невеликих автопарків і може стати фундаментом для подальшого розвитку ITS в Україні.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На підставі результатів аналізу сучасного стану автомобільного транспорту (АТ) і її підсистеми – технічної експлуатації автомобілів (ТЕА) виявлено, що основна частина автомобілів в Україні

зосереджена в невеликих за розміром і кількістю підприємствах. Так за даними Головної держінспекції на АТ [1], частка перевізників, що мають в експлуатації тільки один транспортний засіб (ТЗ) становить 61%, до трьох ТЗ - 22,4%, до п'яти ТЗ - 7%, до десяти - 5,4, більше 10 ТЗ - 4,3%.

Становлення ринкових відносин в системі автомобільного транспорту загального користування (АТЗК), приватизація підприємств автомобільного транспорту (ПАТ) державної власності, придбання транспортних засобів (ТЗ) за власні кошти або придбання їх у оренду привели до появи на ринку транспортних послуг більше 30 тис. пасажирських перевізників [2], які отримали ліцензії на право господарської діяльності з надання послуг з перевезення пасажирів

Слід зазначити, що пасажирські автомобільні перевезення є технологічно централізованою системою, в якій кожний ТЗ має перебувати під диспетчерським контролем і управлінням. Як свідчить досвід вітчизняних і зарубіжних компаній-перевізників, найвища ефективність, якість і безпека досягаються тоді, коли ТЗ отримують необхідне технічне, а водії - медичне обслуговування, автобуси знаходяться в системі постійного спостереження, коли через певні відрізки часу система управління перевезеннями отримує інформацію про місцезнаходження автобуса і може втрутитися в процес перевезення.

У зв'язку з застосуванням на автомобілях вбудованої бортової системи діагностування, розвитку супутникових систем навігації і мобільного зв'язку, сучасних інформаційних технологій з'явилася можливість здійснювати дистанційний моніторинг з оцінкою рівня технічного стану автомобіля, що цілком дозволяє реалізувати практично будь-які завдання по виявленню та прогнозуванню технічного стану автомобіля. Це в свою чергу дозволяє перейти до адаптивної системи ТО і Р автомобілів, ключовим моментом якої є розробка інформаційно-комунікаційної системи і бази прогнозних моделей [3], що забезпечують шляхом моніторингу дистанційне отримання необхідної поточної інформації від рухомого складу (РС), її обробку і вироблення коригувальних впливів.

Інформатизація виробничих, економічних і соціальних процесів в останні десятиліття розвивається надзвичайно високими темпами, що. Не залишився осторонь від неї і транспортно-дорожній комплекс, де одним з основних напрямів інформатизації стало створення і впровадження телематичних та інтелектуальних транспортних систем (ITS) [4]

Інтелектуальна транспортна система це телематична транспортна система, що забезпечує реалізацію функцій високої складності з обробки інформації та вироблення оптимальних (раціональних) рішень і керуючих впливів.

Склад і рівень технічного і програмного забезпечення інтелектуальних транспортних систем моніторингу суттєво залежить як від об'єктів моніторингу, так і від задач, що вирішуються за допомогою систем моніторингу (рис.1) [5]. До об'єктів моніторингу на транспорті, зокрема, автомобільному, можна віднести окремі ТЗ, підприємства автомобільного транспорту (ПАТ) і транспортні потоки. В залежності від виконуваних задач, серед інтелектуальних систем моніторингу транспорту, в першу чергу, можливо виділити системи моніторингу технічних показників ТЗ і транспортних потоків, таких як швидкість руху, режим руху, технічний стан ТЗ, склад транспортного потоку, тощо.

З метою забезпечення оперативності надходження вхідних даних в інформаційно-аналітичну систему, застосовують бортові інформаційно-діагностичні комплекси на ТЗ і засоби телематики, що забезпечують надходження даних в режимі реального часу на спеціально створений сервер бази даних. Застосування геоінформаційної системи забезпечує візуалізацію результатів оцінки рівня інгредієнтного і параметричного забруднення придорожного середовища конкретної автомагістралі. Інформація про параметри навколишнього середовища може бути отримана за допомогою відповідних систем контролю метеорологічних умов.

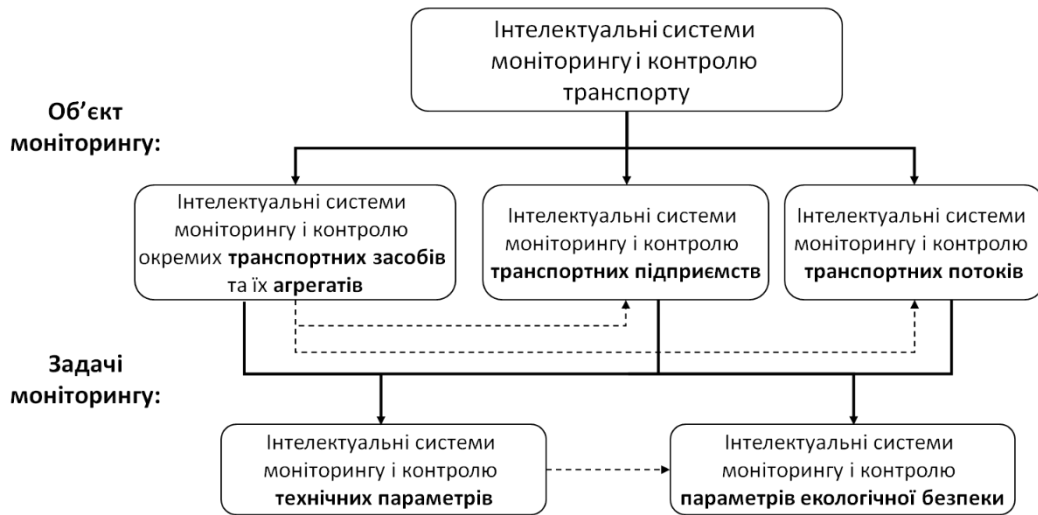


Рисунок 1 – Ієрархія використання інтелектуальних систем на транспорті

Інформація про параметри автомобільної дороги, зокрема стан дорожнього покриття, з відповідною корекцією за погодними умовами, складає відповідну базу даних автомобільних доріг. Отримані дані від окремих ТЗ разом з інформацією про параметри транспортного потоку, дороги та навколишнього середовища складають вхідні параметри, на основі яких відбувається моделювання показників окремих ТЗ, що складають транспортний потік, зокрема, витрати палива та викидів забруднюючих речовин, вмісту основних шкідливих речовин відпрацьованих газів ТЗ в повітрі придорожнього середовища та рівня шуму транспортних потоків.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є побудова і інтеграція інформаційно – програмного комплексу в віртуальне підприємство автомобільного транспорту.

Віртуальне підприємство - метод співпраці суб'єктів ринку для реалізації конкретного проекту, за якого взаємодія між віддаленими учасниками здійснюється за допомогою розподіленого інформаційного середовища із застосуванням електронних засобів комутації

Побудоване віртуальне ПАТ «ХНАДУ - ТЕСА» [6] призначене для вирішення виробничих завдань АТЗК по оптимізації роботи парку РС і є комплексним рішенням по моніторингу і управлінню ЖЦ етапу експлуатації РС в невеликих підприємствах автомобільного транспорту. Воно має усі підрозділи, що і типові ПАТ і може забезпечувати безперервний моніторинг (контроль) параметрів РС при невеликих експлуатаційних витратах за рахунок використання сучасних технологій мобільного бездротового зв'язку і професійного навігаційно-зв'язного обладнання. Впровадження такої технології – дозволяє опанувати новий рівень управління парком АТЗК.

У зв'язку з застосуванням на автомобілях вбудованої бортової системи діагностування, розвитку супутникових систем навігації і мобільного зв'язку, сучасних технологій з'явилася можливість здійснювати дистанційний моніторинг з оцінкою рівня технічного стану автомобіля, що цілком дозволяє реалізувати практично будь-які завдання по виявленню та прогнозуванню технічного стану автомобіля. Це в свою чергу дозволяє перейти до адаптивної системи ТО і Р автомобілів, ключовим моментом якої є розробка інформаційно-комунікаційної системи і бази прогнозних моделей, що забезпечують шляхом моніторингу дистанційне отримання необхідної поточної інформації від РС, її обробку і вироблення коригувальних впливів.

Для втілення адаптивної системи ТО і Р автомобілів розроблена інформаційно-комунікаційна модель системи дистанційного моніторингу автомобіля в умовах експлуатації на основі загального підходу до дослідження системи «Автомобіль - водій - умови експлуатації – інфраструктура експлуатації автомобіля (транспортна і автомобільних доріг)», яка включає системну взаємодію складових компонентів моніторингу: автомобіля (ТЗ) з водієм і бортовим інформаційним комплексом (БІНК); умов експлуатації транспортного засобу (дорожні, транспортні, атмосферне-кліматичні умови і культура праці); транспортної інфраструктури і інфраструктури автомобільних доріг. Для проведення синтезу і аналізу, формування можливих варіантів схем інформаційної системи моніторингу автомобілів в умовах експлуатації було використано морфологічний аналіз

досліджуємої системи. Це дозволяє формувати можливі варіанти інформаційної системи моніторингу ТЗ в умовах експлуатації у вигляді залежності (схем) [7].

Для вирішення поставлених завдань створена структурована інформаційна модель інформаційного програмного комплексу (ІПК) «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» [8], яка фактично забезпечує роботу інформаційної системи оцінювання параметрів технічного стану автомобіля в умовах експлуатації. Розроблені моделі бази даних інформаційно-комунікаційної системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ у вигляді множини компонентів і складових системи інформації, технічних параметрів стану двигуна ТЗ, технічних параметрів стану безпосередньо ТЗ і параметрів умов експлуатації ТЗ, які фактично описують її в межах поставленого завдання дослідження. Виконаний аналіз інформаційних структурних елементів моделі системи моніторингу параметрів технічного стану ТЗ дозволив визначити множину інформаційних елементів системи моніторингу у складі 60 елементів, множину елементів групи у складі 7 елементів, існуючий загальний інформаційний елемент для всіх 7 інформаційних груп - «Час збирання інформації», який є ключовим з причини семантичної залежності одержуваних даних моніторингу параметрів технічного стану ТЗ від часу збирання інформації. Отриманої в результаті проведеного аналізу інформації достатньо для створення системи управління бази даних моніторингу параметрів технічного стану ТЗ в умовах експлуатації реляційного типу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

За допомогою розроблених алгоритмів і сформованої ІСМ, за допомогою транспортної інфраструктури і інфраструктури автомобільних доріг проводилось дослідження процесів моніторингу параметрів технічного стану ТЗ і умов експлуатації (УЕ). Основною метою дослідження було забезпечення роботоздатності сформованої інформаційної системи і забезпечення взаємодії з транспортною інфраструктурою і інфраструктурою автомобільних доріг. За допомогою дистанційного моніторингу параметрів технічного стану ТЗ виконувалось зчитування значень штатних датчиків і робочої інформації системи керування (контроллера) ТЗ [9], а, крім цього, виконувались, функціонально поєднані вимірювальні, обчислювальні і допоміжні операції, які призначені для отримання, перетворення і обробки вимірюваної інформації з метою надання їй функцій контролю та ідентифікації параметрів технічного стану ТЗ [9]. Перелік одержаних сигналів від датчиків і систем двигуна проходив алгоритмічну обробку для формування масивів повідомлень. Після отримання інформації з усіх датчиків масив даних з бортового інформаційного комплексу (БІНК) передавався на сервер за допомогою навігаційних супутникових технологій, а потім інформація надходила до центру моніторингу лабораторії, оснащеної комп'ютером з встановленим стандартним Інтернет браузером, який і виводив отримані дані на екран монітора.

Обмін інформацією в системі моніторингу здійснювався через мережі зв'язку, що дозволяє передавати як цифрові і відео -, так і голосові дані. У пам'ять БІНК закладаються вихідні параметри ТЗ та дані для роботи ІПК у складі БЧ ITS ТЗ а для зручності оперативного управління здійснюється двосторонній зв'язок СЧ ITS з робочим місцем моніторингу ТЗ і іншими учасниками процесу моніторингу [10].

При запуску програмного забезпечення першим з'являлось стартове вікно «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» => «*Ідентифікація ТЗ*» (рис. 2). Вікно, крім стандартних елементів додатків для операційної системи Windows, містить в робочій області інформацію про експлуатацію ТЗ, в яку включено: номер державної реєстрації ТЗ і VIN-код ТЗ.

Крім цього в стартовому вікні введено користувацьке вікно умов експлуатації ТЗ, що дозволяє підключати джерела інформації шляхом вибору: «*Умови експлуатації ТЗ*» => «*Підключення джерел інформації*». В процесі підключення умов експлуатації користувач має можливість підключати і визначати: параметри стану і положення ТЗ, умов експлуатації, атмосферно-кліматичні умови, дорожні умови, ідентифікацію ТЗ. Спочатку одноразово вводиться вся запитувана інформація про ТЗ, який пройшов реєстрацію в програмному забезпеченні «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» на сервері через мережу Інтернет, або за допомогою існуючої інформації у базі даних через мережу Інтернет за допомогою користувацьких програм, а саме:

- номер державної реєстрації ТЗ];
- VIN-код ТЗ.

Підключення джерел інформації для визначення умов експлуатації ТЗ відбувалось шляхом підключення через додаткові кнопки: параметри стану і положення ТЗ, транспортних умов експлуатації, атмосферно-кліматичні умови, дорожні умови, ідентифікацію ТЗ. В цьому випадку ІПК дає можливість інформаційного забезпечення процесів моніторингу параметрів технічного стану ТЗ з

урахуванням умов експлуатації через використання (отримання) наявних джерел інформації в частині координат ТЗ на місцевості в реальному часі, моделі автомобільної дороги, моделі об'єктів інфраструктури доріг, територіальних природних і техногенних систем, отримання результатів трекінгу ТЗ. Для більш зручної візуалізації результатів аналізу в систему додавались фрагменти зображень досліджуваних ділянок автомобільних шляхів. Джерела інформації для інформаційної системи моніторингу технічного стану ТЗ «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» з урахуванням умов експлуатації представлені в [10].

Інформація про номер реєстрації ТЗ (вихідна)

Інформація про VIN-код ТЗ (вихідна)

IdenMonDiaOperCon "HNADU-16"
Ідентифікація транспортного засобу (ТЗ)

Номер державної реєстрації AH3128CM
або
VIN-код ТЗ Y6LF243228L001507

Умови експлуатації ТЗ
Підключення джерел інформації

- ☒ Параметри стану і положення
- ☒ Транспортні умови
- ☒ Атмосферно-кліматичні умови
- ☒ Дорожні умови
- ☒ Ідентифікація ТЗ

Далі >

Підключення джерел інформації для визначення умов експлуатації ТЗ

Стартове вікно

Рисунок 2 – Стартове вікно програмного забезпечення

При формуванні можливих варіантів інформаційної системи моніторингу ТЗ в умовах експлуатації кожна з можливих схем отримання інформації, в залежності від підключених умов експлуатації (рис. 2), розглядалась як ефективний спосіб забезпечення її дієвості для ТЗ [10] які на сьогодні складають основу існуючого парку легкових, вантажних ТЗ і автобусів України.

Після відкриття робочої області і реєстрації ТЗ (пошуку вже зареєстрованого ТЗ) відкривалось робоче вікно «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» => «Ідентифікація ТЗ» => Інформація вихідна в умовах ITS з розширеною робочою областю, яке представлено на рисунку 3.

Після одноразового введення всієї запитуваної інформації про ТЗ, який пройшов реєстрацію в програмному забезпеченні «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» на сервері через мережу Інтернет, а саме:

- ✓ марка ТЗ (марка транспортного засобу (наприклад, KIA CEE'D), вводиться користувачем самостійно);
- ✓ група ТЗ (легкові автомобілі; автобуси масою 2,5-5,0 т; автобуси масою > 5 т (дизелі); вантажні автомобілі масою < 3,5 т; вантажні автомобілі масою 3,5-12,0 т; вантажні автомобілі масою > 12 т (дизелі));
- ✓ модифікація ТЗ (базовий автомобіль, сидельний тягач, з одним причепом, з двома причепами, самоскид з 1 причепом, самоскид з 2 причепами, спеціалізований);
- ✓ рік випуску ТЗ. Рядок складається з цифр і обирається користувачем.

Якщо інформація потребує редагування – натискалась кнопка «Редагувати». Після перевірки інформації натискалась кнопка «Так» (рис. 3). Подальше заповнення форми відбувалось на наступному кроці в рисунку 4.

IdenMonDiaOperCon "HNADU-16"
Ідентифікація транспортного засобу (ТЗ)
Інформація вихідна в умовах ITS

Номер державної реєстрації
 або
 VIN-код ТЗ

Марка ТЗ
 Група ТЗ Тип ТЗ
 Модифікація ТЗ
 Рік випуску

Підтвердити дані

Кнопка «Так»

Кнопка «Редагувати»

Робоче вікно з розширеною робочою областю Інформації про ТЗ

Рисунок 3 – Робоче вікно з розширеною робочою областю Інформації про ТЗ

Після відкриття робочої області і реєстрації ТЗ відкривалось робоче вікно з розширеною робочою областю «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» => «Ідентифікація транспортного засобу (ТЗ)» => База даних обробки GPS-даних, яке представлено на рисунку 4. При цьому одноразово вводиться вся запитувана інформація про ТЗ, який пройшов реєстрацію в програмному забезпеченні «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» на сервері через мережу Інтернет, а саме:

- ✓ номер двигуна ТЗ (номер двигуна транспортного засобу вводиться користувачем самостійно або через мережу Інтернет за допомогою відповідних сайтів);
- ✓ тип палива двигуна (бензин, газ, дизель, тощо);
- ✓ екологічний клас двигуна ТЗ (Євро - 1, Євро - 2, Євро - 3, Євро - 4, Євро - 5, Євро - 6);
- ✓ об'єм двигуна ТЗ. Рядок складається з цифр і вводиться користувачем самостійно;
- ✓ витрата палива двигуном ТЗ. Рядок складається з цифр, які отримані з паспортних даних двигуна ТЗ і вводиться користувачем самостійно.

Інформація про параметри ТЗ зберігалась у відповідній таблиці бази даних (робочій папці) для ТЗ за його номером державної реєстрації (рис. 4).

Для забезпечення необхідності проведення і отримання накопиченої інформації, підключення програмного модуля *Carlife* [7], а також з використанням програмного модуля *Torque* [10] і ПІК «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» виведення на екран і (або) друк отриманої інформації з програмних модулів, *Carlife* і *Torque* та ПІК «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» необхідно поставити перемикач у відповідне положення - увімкнувши накопичення інформації (рис. 4). Для забезпечення необхідності проведення оцінки отриманої інформації і прогнозування технічних параметрів ТЗ ставили перемикач у відповідне положення – увімкнути останній моніторинг.

IdenMonDiaOperCon "HNADU-16"
Ідентифікація транспортного засобу (ТЗ)
База даних обробки GPS-даних

Номер державної реєстрації: ДВЗ:

або
VIN-код ТЗ: Номер ДВЗ:

Марка ТЗ: Тип палива:

Група ТЗ: Екологічний клас:

Модифікація ТЗ: Об'єм двигуна:

Рік випуску: Витрати палива:

Підтвердити дані:

☒ Увімкнути накопичення інформації
☒ Увімкнути останній моніторинг

☒ 1. Підключення Carlife (1)
☒ 2. Підключення Torque та ІПК (2)
Виведення на екран ☐ 1 ☐ 2
Виведення на друк ☐ 1 ☐ 2

Рисунок 4 - Робоче вікно ІПК з розширеною робочою областю

Для забезпечення ідентифікації ТЗ вмикали перемикач підключення програмного модуля *Carlife*, а також програмний модуль *Torque* і ІПК «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» (рис. 4). При цьому, одночасно, для забезпечення реєстрації положення ТЗ на мапі в часі вмикали перемикач Положення ТЗ (рис. 4). Після цього ставали доступними вікна (Показати Torque, Показати GPS-Trace Orange 1, Показати GPS-Trace Orange 2, Показати M2M Lab або ХНАДУ - ТЕСА) з інформацією про положення і технічні параметри ТЗ (початок (дата і час) і кінець (дата і час) формування відповідного звіту про трекінг і моніторинг ТЗ виконується в кожному додатковому вікні окремо). Виведення на друк, налаштування окремих станів ТЗ, отримання індивідуальної інформації про особливості трекінгу і моніторингу ТЗ в кожному з перелічених вікон відбувалось окремо.

При натисканні кнопки підключення *Carlife* (1) (рис.4) відбувалось підключення до програмного модуля (програми, електронного інформаційного модуля) *Carlife* (<http://carlife.in.ua/vin-kod>). *Carlife* - перший всеукраїнський online-сервіс перевірки історії автомобіля за його VIN-кодом. Звіти *Carlife* містять дані про попередніх власників та операціях, пов'язаних з транспортним засобом, а так само про зареєстровані дорожньо-транспортні пригоди. Також, кожен автомобіль перевіряється по базах угону / розшуку. Вибірка інформації ведеться на основі номера кузова (VIN-коду). Особливість сервісу полягає в тому, що виключається людський фактор. Інформація про автомобіль, заснована на аналізі VIN-коду, надходить безпосередньо з серверів різних державних і комерційних організацій, що володіють даними базами. З цієї причини у звітах міститься найточніша і найсвіжіша інформація, адже база оновлюється постійно в режимі реального часу. Докладний звіт про автомобіль генерується від 1 до 15 хвилин. При натисканні кнопки підключення *Torque* і ІПК (2) (рис. 4) відбувається підключення до програмного модуля (програми, електронного інформаційного модуля) *Torque* (<http://ian-hawkins.com:8080/>) і ІПК«IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»».

Для здійснення моніторингу поточних параметрів стану ТЗ переходили в робоче вікно на рисунку 5: «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» => Моніторинг параметрів стану ТЗ => Параметри технічного стану і положення ТЗ. В процесі здійснення моніторингу технічного стану ТЗ в верхній частині робочого вікна (рис. 5) наводились основні технічні характеристики поточного

стану ТЗ, а саме поточне (середнє) значення частоти обертання колінчатого валу двигуна ТЗ (хв^{-1}), тиск моторної оливи в двигуні за наявності необхідного значення, МПа (кольором, а саме червоний – відсутність тиску моторної оливи, зелений – значення тиску відповідає технічним вимогам до двигуна ТЗ), температура охолоджуючої рідини (значення, $^{\circ}\text{C}$), поточна (середня) швидкість ТЗ (значення, км/год).

Основні технічні характеристики поточного стану

IdenMonDiaOperCon "HNADU-16"
Моніторинг параметрів стану ТЗ
Параметри технічного стану і положення ТЗ

ДВЗ

- Оберти ДВЗ (хв^{-1}): 2208
- Тиск оливи: ● ● -
- Температура охолоджуючої рідини ($^{\circ}\text{C}$): 92,5

ТЗ

- Швидкість (км/год): 46
- ☒ Положення ТЗ

☒ Сформувати звіт

Початок дата: 02.02.2017 час: 14:45:31

Кінець дата: 02.02.2017 час: 17:23:45

Друк звіту

Показати Torque

Показати GPS-Trace Orange 1

Показати GPS-Trace Orange 2

Показати M2M Lab або ХНАДУ ТЕСА

< Назад Далі >

Кнопка «Назад» Кнопка «Далі»

Рисунок 5 – Робоче вікно ІПК

Для визначення цифрових значень вказаних вище параметрів ТЗ у відповідний час відповідної дати ставили мітку у відповідному вікні – сформувати звіт. Після цього ставали доступними вікна з інформацією про початок (дата і час) і кінець (дата і час) формування відповідного звіту. Після цього ставало можливим передивитись у вікнах у верхній частині робочого вікна зміну відповідних параметрів за допомогою маніпулятора-миші. При необхідності роздрукувати звіт – натискали кнопку «друк звіту».

Для дослідження і оцінки умов експлуатації в процесах моніторингу параметрів технічного стану ТЗ використовували засоби моніторингу інфраструктури автомобільного транспорту і автомобільних доріг. Для формування звітів про здійснення моніторингу параметрів технічного стану ТЗ переходили в робоче вікно на рисунку 6: «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16» => Моніторинг параметрів стану ТЗ => Параметри технічного стану ТЗ. В процесі формування звітів про здійснення моніторингу технічного стану ТЗ в верхній частині робочого вікна (рис. 6) вибирали дані для визначення інтервалу моніторингу ТЗ, а саме початок часового інтервалу моніторингу (дата і час) і кінець часового моніторингу (дата і час). При цьому, у програмних модулях, що використовували для моніторингу, відбувався пошук відповідних даних для заданого інтервалу часу. У робочому вікні на рисунку 6 можливо побачити результати виконання моніторингу параметрів технічного стану ТЗ.

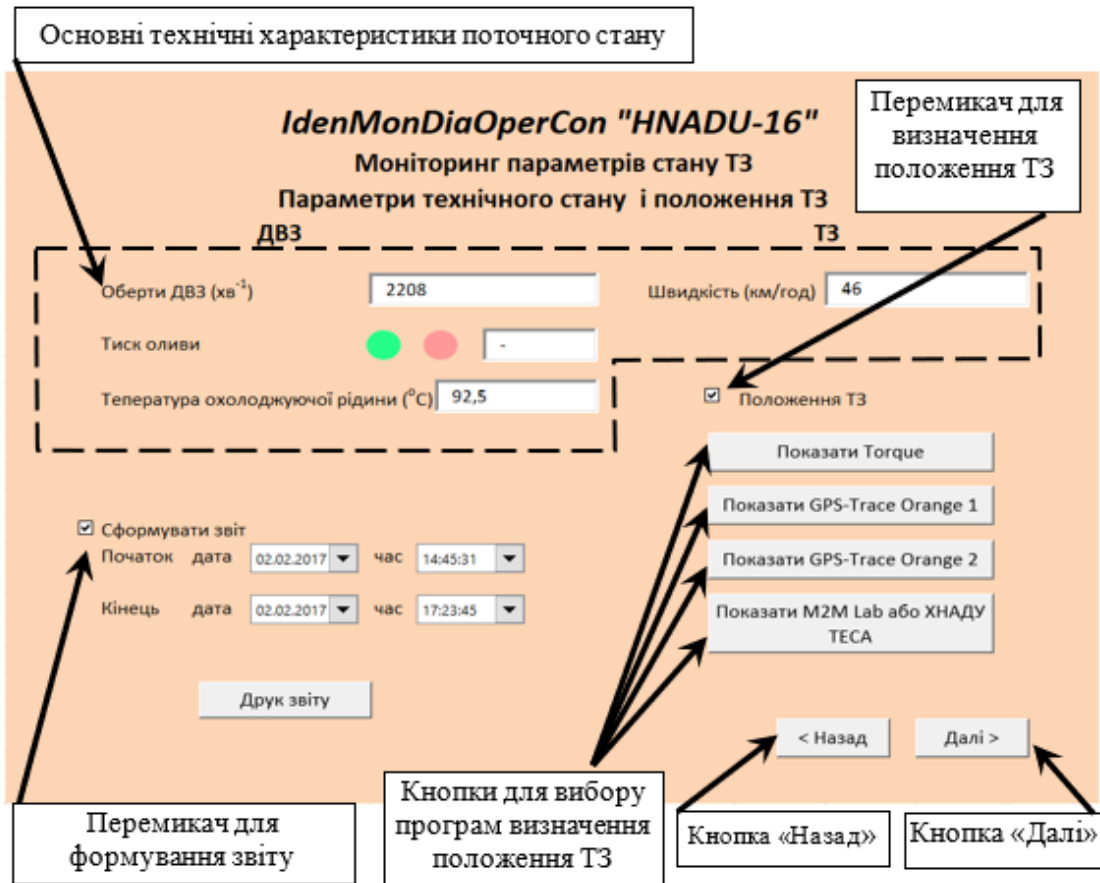


Рисунок 6– Робоче вікно моніторингу ІПК

Для забезпечення необхідності проведення і отримання накопиченої інформації, підключення програмного модуля Carlife [7], а також з використанням програмного модуля Torque [10] і ІПК «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» виведення на екран і (або) друк отриманої інформації з програмних модулів, Carlife і Torque та ІПК «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» необхідно поставити перемикач у відповідне положення - увімкнувши накопичення інформації (рис. 4). Для забезпечення необхідності проведення оцінки отриманої інформації і прогнозування технічних параметрів ТЗ ставили перемикач у відповідне положення – увімкнути останній моніторинг.

В верхній частині робочого вікна (рис. 6) вказуються відповідні дата і час для задавання меж початку і кінця часового інтервалу моніторингу. При цьому у вікні отримували найменування файлів вихідних даних моніторингу. При натисканні кнопки «Огляд» у відповідному діалоговому вікні (рис. 6) отримується повний перелік знайдених файлів моніторингу ТЗ для заданого часового інтервалу (файли і дані вибираються за допомогою програмного модуля Torque). Файли, що отримані за результатами моніторингу, обов'язково повинні бути переконвертовані і підготовлені відповідним чином для подальшого використання. Підготовка файлів моніторингу для подальшого використання здійснювалась згідно передбаченого алгоритму.

Для встановленого раніше часового інтервалу, при використанні програмного модуля M2M Lab або системи ХНАДУ - ТЕСА, в нижній частині робочого вікна (рис. 6) отримували наступна інформація про результати проведеного моніторингу: загальна кількість повідомлень, пробіг за часовий період, часова зона клієнта, час і дата проведення генерування інформації моніторингу, загальний пробіг в поїздах, середня швидкість ТЗ, максимальна швидкість ТЗ, загальна кількість поїздок, час простою, разом стоянок, час без сигналу GPS. Для друку всіх результатів моніторингу параметрів технічного стану ТЗ, при використанні програмного модуля Torque, використовувалась кнопка «Друк» (рис. 6). Для вибіркового друку результатів моніторингу використовувалась кнопка «Перегляд друку» в робочому вікні. Для огляду результатів моніторингу параметрів технічного стану ТЗ, при використанні програмних модулів M2M Lab або ХНАДУ - ТЕСА, використовувалась кнопка «Огляд». Для формування підсумкового звіту про результати моніторингу ТЗ при використанні програмних модулів Torque, M2M Lab або ХНАДУ - ТЕСА натискали кнопку «Підсумковий звіт». В

цьому випадку у відповідному вікні отримували результати моніторингу параметрів технічного стану ТЗ одночасно для різних, вказаних вище, програмних модулів.

Для збору повідомлень і даних про технічний стан та результати діагностування ТЗ, а також для отримання і розшифровування кодів несправностей за спеціально розробленим алгоритмом переходили в робоче вікно на рисунку 7: «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*» => Діагностування параметрів технічного стану ТЗ => Програмні повідомлення про технічний стан і результати діагностики ТЗ. В процесі формування звітів про здійснення моніторингу параметрів і діагностування технічного стану ТЗ отримували програмні повідомлення про технічний стан і результати діагностування ТЗ при використанні програмного модулю *Torque* [7, 10].

Процес діагностування (отримання програмних повідомлень) починався з натискання кнопки «Оновити» (рис. 7).



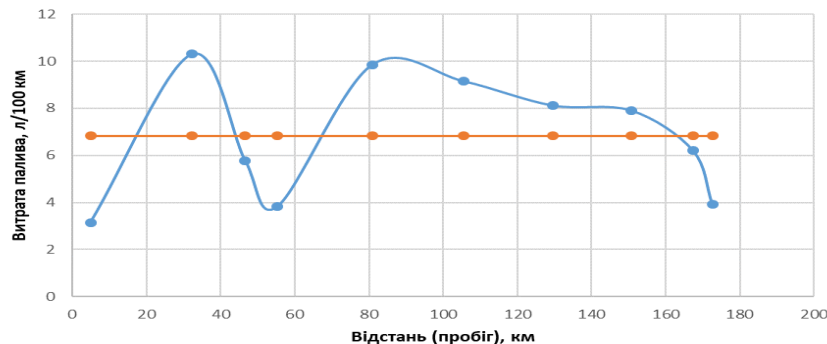
Рисунок 7 – Робоче вікно діагностування ТЗ в ПК

Після здійснення читання (пошуку) кодів похибок в системі діагностування ТЗ на робочому столі в вікні «Наявність помилок і несправностей» висвічувалась кількість кодів похибок (рис. 7). Для перегляду журналу несправностей за відповідний інтервал часу можливо зробити це за допомогою кнопки «Завантажити журнал несправностей». Після натискання кнопки «Отримати коди несправностей» у вікні «Коди несправностей» (рис. 7) отримували знайдені в процесі пошуку коди несправностей ТЗ (у тому випадку, якщо несправності мають місце). Для з'ясування змісту кодів і їх розшифровування існує можливість скористатись базою віртуального підприємства, з яким працює ПК «*IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»*». Для цього, натискаючи кнопку «Пошук в базі» (рис. 7). В цьому випадку у вікні поряд з вікном «Коди несправностей» з'являється варіант інформації детального розшифровування змісту кодів з бази ПК. Якщо отриманої інформації із бази ПК для встановлення причини виникнення отриманих кодів недостатньо, то після натискання на кнопку «Передати отриману інформацію в РМ ММТЗ» [7], отримана з бази інформація передається на робочий стіл комп'ютера РМ ММТЗ для подальшої обробки. Якщо отриманої інформації недостатньо, через робоче вікно програми поверталися в попередні робочі вікна для відтворення даних моніторингу. Це здійснювалось після натискання кнопки «Переглянути результати моніторингу» (рис. 7). Крім цього, цими вікнами користувались для визначення несправності ТЗ при використанні програмних модулів *M2M Lab* або *ХНАДУ - ТЕСА*. У випадку неможливості самостійно прийняти рішення щодо отриманих кодів і визначення статусу несправностей ТЗ, при натисканні

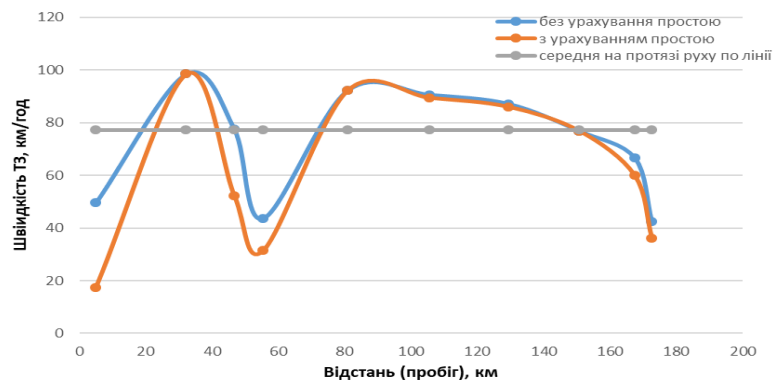
кнопки «Запропонувати варіант подальших дій» (рис. 7), отримували можливий варіант подальших дій від ПК ««IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»». Крім цього, за допомогою ПК через робоче вікно була можливість передати власне повідомлення (SMS, телефонний дзвінок) водію автомобіля (ТЗ) за допомогою натискання кнопки «Передати отриману інформацію на БІНК для водія» (рис. 7). Якщо коди несправності не викликають небезпеки для ТЗ і несправність усунута, за допомогою кнопки «Скинути помилки та очистити звіт» скидали помилки з пам'яті ТЗ та очищали звіт. Прогнозування отриманих в процесі моніторингу параметрів технічного стану ТЗ проводили аналогічно до [7, 10].

Зберігання параметрів стану ТЗ в файлі БД ПК ««IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» відбувалось на всіх етапах роботи ПК в усіх робочих вікнах, а саме наступних даних: результати здійсненні трекінгу і моніторингу ТЗ, отриману з повідомлень і даних про технічний стан та результати діагностування ТЗ; результати отримання і розшифровування кодів несправностей; результати обробки звітів GPS-даних трекінгу і моніторингу ТЗ, що надійшли в робочі папки комп'ютера користувача, БІНК ТЗ, РМ ММТЗ і серверної частини ПК тощо.

Результати дослідження витрати палива (а) і зміни середньої швидкості (б) руху ТЗ на дослідних дільницях в межах відстані шляху, які отримано за допомогою ПК ««IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» (рис. 8).



а



б

Рисунок 8 – Результати дослідження витрати палива (а) і зміни середньої швидкості (б) руху ТЗ на дослідних дільницях в межах відстані шляху

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

На теперішній час встановлено, що основна частина автомобілів в Україні зосереджена в невеликих за розміром і кількістю підприємствах, а існуюча в таких підприємствах система контролю технічного стану вже не відповідає в цілому сучасним вимогам підтримки роботоздатності рухомого складу автомобільного транспорту. Майбутнє за впровадженням в технічну експлуатацію принципів "адаптивної" системи управління технічним станом автомобіля, основою якої є створення інформаційних систем організаційно-функціонального контролю і підтримки процесів технічної експлуатації рухомого складу, які є складовою інтелектуальних транспортних систем.

Створено інформаційний програмний комплекс «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» у вигляді множини інформаційних елементів системи моніторингу, що базується на положеннях теорії експлуатації автомобілів, включенні і взаємодії складових компонентів моніторингу таких як: автомобіля з водієм і бортовим інформаційним комплексом; умов експлуатації ТЗ (дорожні, транспортні, атмосферно-кліматичні умови і культура праці); транспортної інфраструктури і інфраструктури автомобільних доріг.

Показано результати експериментального дослідження витрати палива і зміни середньої швидкості руху ТЗ на дослідних ділянках в межах відстані шляху, які отримано за допомогою ПК «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»».

ВИСНОВКИ

У підсумку дослідження доведено ефективність інформаційно-програмного комплексу «IdenMonDiaOperCon HNADU-16», який, ґрунтуючись на мультиджерельному моніторингу, об'єднує телематичні дані OBD-II, GPS-трекінгу та дорожньої обстановки у реляційній базі даних, структурованій за часовим ключем. Морфологічний синтез архітектури забезпечив гнучкість системи, що складається із семи інформаційних груп і шістдесяти елементів, завдяки чому комплекс легко масштабується та адаптується до умов експлуатації малих автопарків. Польові випробування на маршруті протяжністю 200 км підтвердили працездатність рішення: отримані криві витрати палива й середньої швидкості дали змогу сформуванню енергоефективних режимів руху та своєчасно виявляти відхилення параметрів силового агрегата. Упровадження комплексу забезпечило зменшення споживання палива на 8–10 %, скорочення часу діагностики критичних відмов двигуна та перехід до технічного обслуговування за фактичним станом, що істотно підвищує економічну стійкість малих перевізників. Наукова новизна роботи полягає в поєднанні віртуальної організаційної структури автопідприємства з реальним часом мультиджерельного моніторингу, зосередженого на часовій компоненті даних, без використання дорогих серверних рішень. Практичні результати можуть бути використані для швидкого тиражування системи на малі автогосподарства, а також у програмах підвищення енергоефективності та безпеки перевезень. Перспективи подальших досліджень охоплюють інтеграцію мереж 5G, розширення алгоритмів прогнозування залишкового ресурсу агрегатів і адаптацію комплексу до електромобільного транспорту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Автомобільний транспорт України: стан, проблеми, перспективи розвитку: монографія / За ред. А.М. Редзюка. – Київ: ДП «Державтотранс НДІпроект», 2005. – 400 с.
2. Транспорт і зв'язок України за 2014 рік. – Київ: Консультант, 2015. – 222 с.
3. Волков В.П., Матейчик В.П., Комов П.Б. та ін. Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 64(970). – С. 36–42.
4. Волков В.П., Матейчик В.П., Комов П.Б. та ін. Інформаційні технології в технічній експлуатації автомобілів. – Харків: ХНАДУ, 2013. – 400 с.
5. Дмитриченко М.Ф., Матейчик В.П., Волков В.П. та ін. Програмне забезпечення систем моніторингу транспорту. – Київ: Вид-во НТУ, 2016. – 200 с.
6. Волков В.П., Комов П.Б., Комов О.Б. та ін. Технічний регламент програмного продукту «Віртуальний механік “HADI-12”» при звичайній роботі: свідоцтво № 47230 від 15.01.2013 р.
7. Волков В.П., Грицук І.В., Грицук Ю.В. та ін. Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 299 с.
8. Волков В.П., Грицук І.В., Грицук Ю.В. та ін. Технічний регламент і результати роботи ПК «IdenMonDiaOperCon “HNADU-16”»: свідоцтво № 75506 від 22.12.2017 р.
9. Грицук І.В., Волков В.П., Худяков І.В. та ін. Оперативний контроль технічного стану транспортних засобів: монографія. – Харків–Херсон–Вінниця: ПП ТД «Едельвейс і К», 2022. – 197 с.
10. Волков В.П., Матейчик В.П., Грицук П.Б., Грицук І.В. Моніторинг технічного стану автомобілів в життєвому циклі. – Харків: ХНАДУ, 2017. – 300 с.

REFERENCES

1. Derzhavtotrans NDIproekt (Ed.). (2005). *Avtomobil'nyi transport Ukrainy: Stan, problemy, perspektivy rozvytku* [Automobile transport of Ukraine: State, problems, prospects] (400 p.). Kyiv, Ukraine: DP "Derzhavtotrans NDIproekt".
2. Konsultant. (2015). *Transport i zv'jazok Ukrainy za 2014 rik* [Transport and communication of Ukraine in 2014] (222 p.). Kyiv, Ukraine: Author.
3. Volkov, V. P., Mateichyk, V. P., & Komov, P. B. (2013). Orhanizatsiia tekhnichnoi ekspluatatsii avtomobiliv v umovakh formuvannia intelektualnykh transportnykh system [Technical operation of vehicles under ITS formation]. *Visnyk NTU "KhPI"*, 64(970), 36–42.
4. Volkov, V. P., Mateichyk, V. P., & Komov, P. B. (2013). *Informatsiini tekhnolohii v tekhnichnii ekspluatatsii avtomobiliv* [Information technologies in vehicle maintenance] (400 p.). Kharkiv, Ukraine: KhNADU.
5. Dmytrychenko, M. F., Mateichyk, V. P., & Volkov, V. P. (2016). *Programne zabezpechennia system*

monitorynhu transportu [Software for transport monitoring systems] (200 p.). Kyiv, Ukraine: NTU Publishing House.

6. Volkov, V. P., Komov, P. B., & Komov, O. B. (2013). *Tekhnichniy rehlement produktu "Virtualnyi mekhanik HADI-12" pry zvychaih roboti* [Technical regulations for the "Virtual Mechanic HADI-12" product] (Copyright Certificate No. 47230). Kharkiv, Ukraine.

7. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., & Hrytsuk, Yu. V. (2018). *Informatsiini systemy monitorynhu tekhnichnoho stanu avtomobiliv* [Information systems for vehicle condition monitoring] (299 p.). Kharkiv, Ukraine: FOP Panov A. M.

8. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., & Hrytsuk, Yu. V. (2017). *Tekhnichniy rehlement ta rezultaty roboty IPK "IdenMonDiaOperCon HNADU-16"* [Technical regulations and performance of IPC "IdenMonDiaOperCon HNADU-16"] (Copyright Certificate No. 75506). Kharkiv, Ukraine.

9. Hrytsuk, I. V., Volkov, V. P., & Khudiakov, I. V. (2022). *Operatyvnyi kontrol' tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv* [Operational control of vehicle technical condition] (197 p.). Kharkiv, Kherson, Vinnytsia, Ukraine: Edelweis & K.

10. Volkov, V. P., Mateichyk, V. P., Hrytsuk, P. B., & Hrytsuk, I. V. (2017). *Monitorynh tekhnichnoho stanu avtomobiliv v zhyttievomu tsykli* [Monitoring of vehicle technical condition throughout the life-cycle] (300 p.). Kharkiv, Ukraine: KhNADU.

Volkov V. P., Onyshchuk V. P., Volkova T. V., Levchuk M. A. Integration of an Information-Software Complex into a Virtual Road-Transport Enterprise.

The paper presents the design and integration of the information-software complex "IdenMonDiaOperCon HNADU-16" into a virtual road-transport enterprise intended for remote monitoring, diagnostics and forecasting of the technical state of small-size vehicle fleets. The complex fuses OBD-II diagnostics, GPS tracking and road-condition data delivered by the CarLife and Torque mobile modules into a relational database structured around the semantic key "time of data acquisition". A morphological synthesis was applied to generate the system architecture comprising seven information clusters and sixty elements, thereby ensuring adaptability to diverse operating conditions. Field tests conducted on a 200 km route produced fuel-consumption and average-speed curves that revealed energy-efficient driving patterns. Implementation of the complex reduced fuel consumption by 8–10 %, shortened the time required to detect critical power-train failures and enabled condition-based maintenance scheduling—benefits of particular importance for private carriers running fleets of one to five vehicles. Scientific originality lies in combining a virtual organisational framework with multi-source monitoring algorithms centred on the temporal dimension, which secures coherent real-time data fusion. The obtained results can be employed in developing management systems for small transport enterprises and in deploying intelligent transport-system concepts within urban logistics.

Keywords: intelligent transport systems, vehicle monitoring, diagnostics, telematics, database, OBD-II, virtual enterprise.

ВОЛКОВ Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, e-mail: volf-949@ukr.net

ОНИЩУК Василь Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: Vasyl.Onyshchuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>

ВОЛКОВА Тетяна Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, e-mail: wolf949@ukr.net

ЛЕВЧУК Максим Анатолійович, здобувач третього (аспірантського) рівня вищої освіти, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, e-mail: Levchuk.max@gmail.com. ORCID 0009-0006-3736-7465. Levchuk Maksym

Vladimir VOLKOV, doctor of technical sciences, professor, head of the department of technical operation and service of cars, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkov, e-mail: volf-949@ukr.net

Vasyl ONYSHCHUK, PhD in Engineering, head of the department of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: Vasyl.Onyshchuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>

Tetiana VOLKOVA, Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of Department Transport Technology, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkov, e-mail: wolf949@ukr.net

Maksym LEVCHUK, PhD student (third, doctoral level of higher education), Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: Levchuk.max@gmail.com; ORCID 0009-0006-3736-7465.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1720

Гандзюк М.О.
Луцький національний технічний університет

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ У ГЕТЕРОГЕННИХ ДИНАМІЧНИХ АВТОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

Завдання підвищення ефективності вантажних автомобільних перевезень особливої актуальності набуває в сучасних економічних умовах, що визначаються як динамічно нестабільні та з високою часткою невизначеності в інформаційних ситуаціях прогнозування розвитку галузі. Ключовим елементом в організації транспортного процесу вантажних автомобільних перевезень є маршрутизація руху рухомого складу як сукупність процедур вибору оптимальних характеристик маршруту руху, що визначають ефективність їх організації при оперативному плануванні перевезень.

Завдання маршрутизації стає особливо актуальним при багатоваріантності і багатоаспектності розподілу вантажних потоків в умовах, що динамічно змінюються. У цьому випадку завдання оптимальної маршрутизації може бути вирішене лише на основі розробки спеціалізованого математичного апарату - аналітичного інструменту прийняття ефективних рішень.

Тому можна стверджувати, що затребуване практикою завдання оптимізації процесів маршрутизації в динамічно змінюваному середовищі є таким, що потребує системного вирішення у динамічно змінних умовах оперативного планування автомобільних вантажних перевезень. Це дозволить системно, з урахуванням критеріїв та факторів, що динамічно змінюються, керувати комерційною експлуатацією рухомого складу вантажних автотранспортних підприємств.

Ключові слова: оперативне планування, гетерогенна динамічна транспортна система (ГДТС), вантажні автомобільні перевезення (ВАП), маршрутизація, багатокритеріальна оптимізація, інтелектуальні транспортні системи, математичне моделювання, метод DEA (Data Envelopment Analysis), ефективність, інформаційна невизначеність, цифрові алгоритми управління.

ВСТУП

Вирішення проблеми ефективної організації процесу вантажних автомобільних перевезень (ВАП) є одним із пріоритетних завдань, затверджених у Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року [1]. Незважаючи на високу питому вагу автомобільного транспорту (АТ) у транспортній системі України, рівень застосовуваних технологічних процесів та методів організації ВАП значно поступається іншим видам транспорту. Більшою мірою проявляється відставання у рівні застосовуваних технологічних процесів у порівнянні з розвиненими країнами Європи та США, що негативно позначається як на об'ємних, так і на економічних показниках ефективності ВАП.

Завдання підвищення ефективності ВАП особливої актуальності набуває в сучасних економічних умовах, що визначаються як динамічно нестабільні та з високою часткою невизначеності в інформаційних ситуаціях прогнозування розвитку галузі. Ключовим елементом в організації транспортного процесу ВАП є маршрутизація руху рухомого складу (РС) як сукупність процедур з вибору оптимальних характеристик шляху, що визначають ефективність організації маршрутів при оперативному плануванні ВАП.

В даний час процеси оперативно-виробничого планування вантажних автомобільних перевезень відбуваються в умовах, коли результативні показники ВАП можуть змінюватися в процесі однієї їздки автомобіля через зміни в інформаційному середовищі взаємовідносин «споживач-перевізник». В даних умовах виникає необхідність підвищення ефективності маршрутизації, що полягає у можливості зміни схеми маршруту в «онлайн» режимі із застосуванням керуючих алгоритмів, перетворених у цифрові формати.

Саме тому пошук оптимальних рішень у неоднорідних динамічних автотранспортних системах при оперативно-виробничому плануванні перевезень вантажів з урахуванням декількох критеріїв ефективності є досить актуальним завданням.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Будь-які процеси оптимізації роботи транспортно-логістичних систем ускладнюються характерними особливостями об'єкта управління - транспортного потоку, що має такі властивості як стохастичність, нестационарність, інерційність, відсутність взаємопов'язаності елементів та наявність нестійкості зв'язків. Транспортна наука постійно шукала нових технологічних прийомів ефективного управління таким нестабільним об'єктом. Системи управління транспортно-логістичними системами розвивалися від моделей жорсткого локального однопрограминого регулювання до автоматизованих

систем управління. В даний час декларується необхідність застосування принципів штучного інтелекту, тобто перетворення транспортно-логістичних систем в інтелектуальні транспортні системи, що використовують алгоритми самонавчання та системи на основі моделей обробки великих баз даних та нейромережових технологій [2].

Цей підхід набув широкого поширення за кордоном, але вимагає змін як у структурі управління вантажними автомобільними перевезеннями, так і у способах їх організації. Наприклад у США наземна транспортна інфраструктура історично управлялася різними організаціями зі своїми специфічними цілями і завданнями. Управлінські структури мали різні розміри та зони відповідальності [3]. Вже в середині 1990-х рр. минулого століття були розроблені національні стандарти для окремих систем управління магістралями та суміжним системам. Прийнятий у 1991 р. конгресом США документ Intermodal Surface Transportation Efficiency Act (ISTEA) був основою розвитку наземного транспорту в усіх його аспектах. З 1998 р. структура систем керування транспортом у США підпорядковується документу Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21), в якому визначено функціональний поділ за специфічними секторами: інтелектуальні АТС (Intelligent Vehicle Initiative), міська інфраструктура (Metropolit), позаміська інфраструктура (Rural Infrastructure), комерційний транспорт (Commercial Vehicle Infrastructure).

Питання інтеграції цих всіх систем у єдине управління набув розвитку у зв'язку зі зростанням можливостей застосування обчислювальної техніки та засобів комунікації для створення цифрових сервісів управління рухом всіх видів транспорту [4] та [5]. З кожним роком цей напрямок поєднання бізнесу та технологічних можливостей отримує все більший розвиток [6], [7] та [8]. У 2006 р. було розроблено "Посібник зі скоординованої експлуатації автострад і магістралей" (Coordinated Freeway And Arterial Operations Handbook) [9].

Основним принципом управління в даному документі є формування «коридорів» або ділянок магістралей з високим ступенем передбачуваності та надійності параметрів переміщення транспортних засобів по деяких територіях. При формуванні процедур інтегрованого управління «коридорами» реалізується загальносистемний підхід (загальна теорія систем) з наступною їх трансформацією в процедури управління, характерні для складних систем (теорія складних систем).

В даний час у процесах розробки інтелектуальних транспортних систем в США визначилася тенденція переходу до «активного управління» (Active Traffic Management) [10], [11] і [12], що передбачає математичне моделювання параметрів впливу на транспортний потік окремих автотранспортних засобів і на основі сукупних оцінок прогнозування параметрів транспортного потоку в цілому [13]. Цей підхід вимагає при координації керуючих дій створити єдину інформаційно-комунікаційну мережу, кожен елемент якої повинен співвідносити свої дії із загальною концепцією управління.

Таким чином, поняття «одиниця управління» переноситься з усього транспортного потоку на окремих об'єкт (окрема партія вантажу, окремих транспортний засіб, окремих пасажир).

Дана інтеграція об'єктів інтелектуальної транспортної системи містить велику кількість видів і типів зв'язків [14]. Процес управління в інтелектуальній транспортній системі вимагає створення єдиної системи управління інформаційними потоками та розробки об'єктно-орієнтованих моделей управління у транспортній мережі, що формують оптимальні траєкторії переміщення окремих об'єктів. Таким чином, необхідно розробляти алгоритми управління, засновані на аналітичних моделях і алгоритми теорії інформаційної взаємодії, які здатні підтримувати необхідну ємність і цілісність взаємодії між об'єктами інтелектуальної транспортної системи.

Для розв'язання цього завдання необхідна розробка математичних моделей розв'язання багатокритеріальних завдань, які можна використати у ГДТС, що дозволять оперувати великими базами даних за умов невизначеності навколишнього середовища.

Рішення будь-якої оптимізаційної задачі, спрямованої на визначення оптимального варіанта дій у системі, зазвичай, починають із вибору критерію чи критеріїв ефективності. Це важливий етап, оскільки неправильний вибір параметрів ефективності може призвести до прийняття абсолютно необ'єктивних, а отже, неефективних рішень у ГДТС. Однак на практиці при вирішенні системних завдань в умовах багатокритеріальності, як правило, роблять принципову помилку, реалізуючи компромісний підхід: багатокритеріальні інформаційні ситуації штучно зводять до однокритеріальних.

У результаті, коли багатокритеріальна задача зводиться до однокритеріальної і оптимізація процесів управління в ГДТС ведеться за єдиним критерієм, рішення можуть виявитися прийнятними, але не бути оптимальними.

Важливою роботою в галузі розвитку теорії складних систем (ТСС) вважається дослідження Hiroki Sayama [15], згідно з яким ТСС об'єднує цілий науковий напрямок, у тому числі і загальну теорію систем (ЗТС) і є більш загальною відповідно до класичних підходів системного аналізу. Структура ТСС показана на рисунку 1 [15].



Рисунок 1 - Структура теорії складних систем (ТСС)

ГДТС, будучи складною системою, належить до класу динамічних систем. Теорія динамічних систем (ТДС) сьогодні займає особливе місце у ТСС, виходячи з її визначення. ТДС - це система, стан якої визначається набором законів цілеспрямованої зміни параметрів системи [16]. На рисунку 2 наведено структуру складних систем, ознаки яких наявні у ГДТС.



Рисунок 2 - Орієнтовна структура складних систем

Як будь-яка складна система ГДТС потребує вміння обробки «великих масивів даних», що визначається наявністю великого обсягу самих оброблюваних даних.

Тому при формуванні моделі та методів оптимізації в ГДТС необхідно:

- формалізувати складність ГДТС, спираючись на інформаційні стани системи;
- вибрати критерії подільності ГДТС, які враховують гетерогенність елементів системи;
- розробити інструменти управління та оптимізації функціонування в ГДТС з урахуванням потенційних можливостей існуючих методів теорії прийняття рішень;
- розробити аналітичну модель та алгоритм для визначення оптимальних маршрутів при оперативно-виробничому плануванні перевезень на основі інтеграції в задачу динамічного програмування результатів вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації при виборі керуючої дії для кожного дискретного стану ГДТС.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є пошук оптимальних рішень у неоднорідних динамічних автотранспортних системах при оперативно-виробничому плануванні перевезень вантажів з урахуванням декількох критеріїв ефективності.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Активне впровадження інформаційно-комутативних (цифрових) технологій в сучасну практику

проектування транспортно-логістичних систем вимагає розвитку теоретичних основ формування оптимізаційних математичних моделей і програмного забезпечення на їх основі, що дозволяє визначати всі компоненти та їх ефективність у складних гетерогених динамічних транспортних системах. При цьому необхідні аналітичні інструменти для обробки більших обсягів даних: аналітичні аналоги нейронних мереж, алгоритми штучного інтелекту та ін.

Так як гетерогена динамічна транспортна система є складною системою, що визначається великою сукупністю формалізованих показників (баз даних), то для пошуку ефективних рішень необхідно враховувати велику кількість критеріїв, як обов'язкових ознак ефективності. Отримання достовірних рішень у багатокритеріальних інформаційних ситуаціях завжди викликає труднощі, що носять об'єктивний характер.

Сучасні математичні моделі пошуку ефективних рішень у гетерогених динамічних транспортних системах штучно зводять багатокритеріальні інформаційні ситуації до однокритеріальних. Цей підхід має важливий недолік - отримане рішення може бути прийнятним, але з необ'єктивним результатом. Тому необхідна розробка математичних моделей розв'язання багатокритеріальних задач у гетерогених динамічних транспортних системах, що дозволяють оперувати великими базами даних за умов невизначеності.

Важливою умовою, що висувається до методів розв'язання завдань у гетерогених динамічних транспортних системах, є необхідність працювати з великою кількістю «вхідних параметрів». Розглянемо можливість обробки «великих баз даних» з допомогою методів, побудованих на на моделях теорії прийняття рішень. Прикладом цього підходу може бути широко використовуваний метод вимірювання формальної ефективності або аналізу середовища функціонування - Data Envelopment Analysis (DEA), заснований на побудові межі ефективності [17, 18]. Цей метод було запропоновано 1978 року американськими вченими A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes [19], які у свою чергу спиралися на ідеї M.J. Farrell. Цей метод застосовується для визначення ефективності в соціально-організаційних системах для однорідних об'єктів. Сутність методу полягає у визначенні розбіжності між відношенням результатів та виробничих можливостей досліджуваного об'єкта. Межі виробничих можливостей, як правило, невідомі а їх визначення виконується або за допомогою методу DEA, або на підставі емпіричних даних, включених у вибірку дослідження [20].

Межі виробничих можливостей показують альтернативне (максимально можливе рішення) за наявних ресурсів досліджуваної системи. Метод DEA сьогодні активно вдосконалюється та розвивається. Він може застосовуватися в різних сферах діяльності і спрямований на підвищення ефективності їх систем функціонування, а значить на дослідження можливостей складних систем.

Цей метод має низку незаперечних переваг. Він дозволяє:

- 1) одночасно обробляти досить багато «вхідних» і «вихідних» параметрів, кожен з яких може визначатися в різних одиницях виміру;
- 2) враховувати вплив середовища на аналізовану складну систему, тобто змінні фактори, зокрема зовнішнього середовища;
- 3) не вимагає апріорного визначення коефіцієнтів відносної важливості або вагових коефіцієнтів для змінних показників, що є «вхідними» та «вихідними» параметрами в задачах оптимізації;
- 4) не накладати обмеження на функціональну форму залежностей між «вхідними» та «вихідними» параметрами;
- 5) при необхідності враховувати переваги або пріоритет, що стосуються значущості тих чи інших «вхідних» або «вихідних» параметрів;
- 6) проводити конкретну оцінку необхідних змін «вхідних» або «вихідних» параметрів, які дозволять наблизити неефективні об'єкти дослідження до певної межі ефективності;
- 7) формувати Парето-оптимальну множину, яка відповідає ефективному стану об'єкта;
- 8) концентруватись на виявленні "best practice" за допомогою об'єктивних аналітичних методів теорії прийняття рішень, а не на суб'єктивних прогностичних тенденціях "трендах", які отримуються при застосуванні методів регресійного або кореляційного аналізу.

Важливою властивістю методу DEA є можливість визначення множини Парето або множини ефективних планів.

Недоліком методу DEA є процедура визначення меж виробничих можливостей об'єкта системи на підставі емпіричних даних. Розв'язання цієї задачі лежить у галузі математичного прогнозування можливих максимально ефективних рішень. Як правило, це завдання є багатокритеріальною нелінійною багатовимірною задачею оптимізації, що вирішується наступним чином:

- вводиться параметр логарифмічної надійності

$$P = \ln(P); (1)$$

- визначається критерій оптимальності у лінійній формі

$$P_{cp} \frac{\sum_l (\sum_{\mu_l} P_k + \sum_{\mu_l} P_{ij})}{\ln \sum_{ij} r_{ij}} = \sum_l \beta_l x_l, \quad (2)$$

де β_l - константи, що визначають структуру системи.

Для вирішення багатокритеріальної задачі в умовах стохастичної невизначеності будується лінійна залежність критеріїв оптимізації

$$J_j(x) = K_1 C(x) - K_2 P_{cp}(x) - K_3 P_3(x), \quad (3)$$

де K_1, K_2, K_3 - вагові коефіцієнти.

Для вирішення багатокритеріальної задачі в умовах стохастичної невизначеності при вирішенні завдань, пов'язаних з неточною інформацією, можливе застосування методів лінійного програмування на основі методу районування за принципом дотримання ієрархічного співвідношення ймовірностей можливих станів зовнішнього середовища (СЗС).

Для цього сформуємо матрицю ефективностей можливих дій при різних станах зовнішнього середовища, що характеризується трьома основними поняттями:

m - число дій;

n - кількість критеріїв;

E_{ij} - ефективність i -ої дії для j -го критерію, $i = \overline{1, m} \quad j = \overline{1, n}$.

При вирішенні практичних завдань, що виникають у процесі управління автомобільним транспортом, в основному використовуються наступні критерії ефективності:

- 1) максимум перевезеного обсягу вантажу;
- 2) максимум виконаної транспортної роботи;
- 3) максимум прибутку, отриманого від перевезення вантажу;
- 4) мінімум витрат, пов'язаних із виконанням перевезень;
- 5) мінімум використаних на перевезеннях автомобілів;
- 6) максимум середнього коефіцієнта використання пробігу;
- 7) мінімум простою автомобілів в ремонті;
- 8) мінімум втрат транспортної роботи у процесі ВАП;
- 9) мінімум витрат часу на виконання перевезень та ін.

Кожен з перерахованих критеріїв має певні переваги і може бути застосований на автомобільному транспорті. Наприклад, у ряді робіт для змінно-добового планування як критерій ефективності пропонується або мінімум витрат транспортної організації на здійснення перевезень, або мінімум витрат часу на виконання заданого обсягу перевезень.

Матриця ефективностей при різних СЗС має вигляд:

$$\|E_{ij}\| = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{m1} & E_{m2} & \dots & E_{mn} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Розподіл коефіцієнтів відносної важливості (КВВ) для окремих критеріїв визначається обмеженням:

$$0 \leq k_j \leq 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad \sum_{j=1}^n k_j = 1, \quad (5)$$

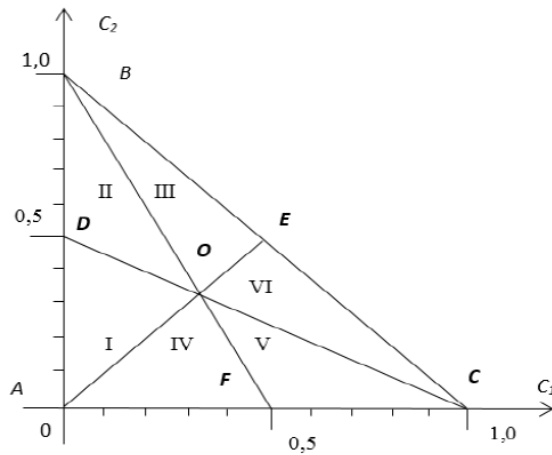
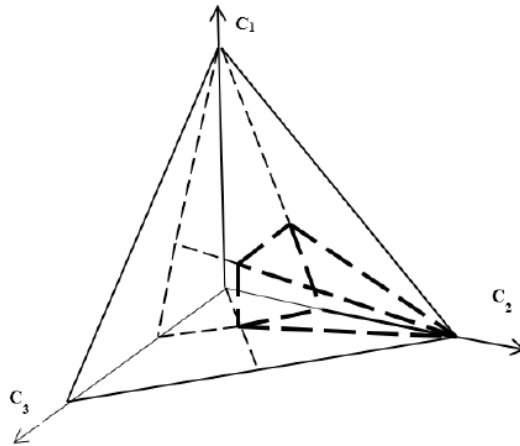
чи

$$\sum_{j=1}^{n-1} k_j = 1. \quad (6)$$

Нехай значення КВВ підпорядковуються послідовності:

$$k \geq k_2 \geq \dots \geq k_j \geq \dots \geq k_{n-1} \geq k_n. \quad (7)$$

При $n = 3$ поле розподілів КВВ - прямокутний трикутник з одиничними катетами (рисунок 3), а при $n=4$ (рисунок 4) кількість підмножин, кожній з яких відповідає своє співвідношення КВВ, дорівнює $P_4=4!=24$.

Рисунок 3 - Поле розподілів - $k_j \in C$, $P_3=3!=6$ Рисунок 4 - Поле розподілів - $k_j \in C$, $P_4=4!=24$

Згідно з рисунком 3 сформуємо таблиці 1 та 2.

Таблиця 1 - Рівняння сторін та медіан трикутника ABC

Відрізки	Рівняння відрізків
AB	$k_2+k_3=1; k_1=0$
AC	$k_1+k_3=1; k_2=0$
BC	$k_1+k_2=1; k_3=0$
AE	$k_1=k_2; k_1+k_2+k_3=1$
BF	$k_1=k_3; k_1+k_2+k_3=1$
CD	$k_2=k_3; k_1+k_2+k_3=1$

Таблиця 2 - Геометричне поле розподілу КВВ - k_j

Підмножина	Трикутник	Співвідношення КВВ
I	AOD	$k_1 < k_2 < k_3$
II	DOB	$k_1 < k_3 < k_2$
III	BOE	$k_3 < k_1 < k_2$
IV	EOC	$k_3 < k_2 < k_1$
V	COF	$k_2 < k_3 < k_1$
VI	FOA	$k_2 < k_1 < k_3$

З таблиці 2 видно, що це можливі рішення для системи

$$0 \leq k_j \leq 1; \quad k_3 \leq k_2 \leq k_1 \quad (8)$$

знаходяться у підмножині IV.

Цей підхід дозволяє сформулювати алгоритм пошуку максимального ефективного (оптимального) рішення:

$$\begin{cases} D_i = \sum_{j=1}^n E_{ij} k_j \rightarrow \max \\ \sum_{j=1}^n k_j = 1, 0 \leq k \leq 1, k_j \geq k_{j+1}, j = \overline{1, n-1} \end{cases}, \quad (9)$$

де

$$k_j = \begin{cases} \frac{1}{c}, \text{ якщо } j = c \\ \frac{\lambda}{c}, \text{ якщо } j < c, \text{ де } \lambda = \frac{n-1}{n}, \\ \frac{1-\lambda}{n-c}, \text{ якщо } j > c \end{cases}, \quad (9)$$

де індекс (с) визначається як $E_{cj} = \max E_{ij}$.

Інтеграція в єдину аналітичну платформу задачі динамічного програмування та розглянутого вище методу районування за принципом ієрархічного співвідношення між ймовірностями дозволить:

- визначати формальну ефективність у ГДТС;
- виконувати обробку великих обсягів даних ГДТС;
- виконувати аналіз середовища функціонування ГДТС із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту з необмеженою кількістю критеріїв чи чинників ефективності.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі обґрунтовано, що підвищення ефективності вантажних автомобільних перевезень є вкрай актуальним завданням у сучасних умовах нестабільності економіки та невизначеності прогнозних сценаріїв розвитку транспортної галузі. Гетерогенні динамічні автотранспортні системи характеризуються складною структурою, стохастичністю, нестационарністю та великою кількістю взаємозалежних параметрів, що ускладнює прийняття ефективних рішень у процесі перевезень.

Визначено потребу у переході до інтелектуальних транспортних систем, які базуються на алгоритмах штучного інтелекту, самонавчанні та роботі з великими обсягами даних, що дозволяє адаптувати маршрутизацію в режимі реального часу.

Запропоновано поєднання методів динамічного програмування та Data Envelopment Analysis (DEA) для багатокритеріального аналізу ефективності. Це дозволяє уникнути спрощень, пов'язаних із редукцією багатокритеріальної задачі до однокритеріальної.

Детально розглянуто підхід до розподілу коефіцієнтів відносної важливості критеріїв (КВВ) та формалізація поля розподілу можливих рішень у вигляді геометричних множин, що дозволяє системно обирати Парето-оптимальні варіанти дій.

ВИСНОВОК

Встановлено, що ГДТС має всі обов'язкові ознаки, характерні для будь-якої складної системи, такі як велика кількість зв'язків та елементів, які відносяться до складних за всіма критеріями ЗТС (загальної теорії систем) і ТСС (теорії складних систем). Дана система вимагає вміння обробки «великих масивів даних», що визначаються наявністю великого обсягу оброблюваних даних, тому при формуванні моделі та методів оптимізації маршрутів у ГДТС необхідно:

- формалізувати складність ГДТС, спираючись на інформаційні стани системи, які, у свою чергу, визначаються можливими внутрішніми та зовнішніми збуреннями;
- визначити критерії подільності ГДТС, які передбачають гетерогенність елементів системи;
- розробити інструменти управління та оптимізації функціонування в ГДТС з урахуванням потенційних можливостей існуючих методів теорії прийняття рішень.

Визначено, що застосування методів теорії прийняття рішень (метод районування) дозволяє вирішити поставлені завдання. При цьому:

- вдається уникнути недоліків евристичних методів одержання інформації з урахуванням думки фахівців-експертів при визначенні вагових коефіцієнтів показників (ВКП);
- процедура отримання ВКП повністю формалізована, а отже, легко реалізується у ПЗ.

Доведено, що необхідним інструментом маршрутизації перевезень є інтеграція задачі динамічного програмування та розглянутого методу районування за принципом ієрархічного співвідношення між ймовірностями в єдину аналітичну платформу, що дозволить:

- визначати формальну ефективність у ГДТС;
- виконувати обробку великих обсягів даних ГДТС;

- виконувати аналіз середовища функціонування ГДТС із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту з необмеженою кількістю критеріїв чи чинників ефективності.

Запропонований підхід дозволяє формувати цілісну аналітичну платформу для прийняття ефективних рішень у сфері вантажних автомобільних перевезень, що охоплює всі аспекти - від стратегічного планування до оперативного реагування.

Для створення методики визначення оптимальних маршрутів у умовах оперативного планування автомобільних вантажних перевезень, що динамічно змінюються, в подальшому повинна бути виконана розробка оптимізаційної аналітичної моделі об'єктно-орієнтованого управління та алгоритмів на її основі:

- алгоритм та ПЗ вирішення задачі динамічного програмування, що реалізують принцип Беллмана, що дозволяють визначати оптимальну траєкторію (маршрут) переміщення вантажу в ГДТС;
- алгоритм та ПЗ вирішення задачі визначення Парето-оптимальних варіантів дій у разі багатокритеріальності у досліджуваній ГДТС;
- інтеграція розроблених алгоритмів та ПЗ у єдиний програмний комплекс.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалено постановою Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550.
2. US Public Law 105-178 Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21), 1998.
3. History of Intelligent Transportation Systems // U.S. department of transportation, report FHWA-JPO-16-329, 2016.
4. Нефедова Я.И., Мнацаканян М. С. Моделирование ситуационных систем транспортных потоков в условиях влияния факторов неопределенности // V International Scientific Conference. II International Symposium of Young Researchers. - Katowice: Silesian University of Technology, 2013. - С. 493-501.
5. ITMS Operational Test of Advanced Traffic Management and Traveler Information Systems in the Twin Cities Metropolitan Area // Minnesota Department of Transportation, 1992.
6. Ma J. An efficiency-Equity Solution to The Integrated Transportation Corridor Control Design Problem // University of California, 2008.
7. Integration of Off-ramp and Arterial Signal Controls to Minimize the Recurrent Congestion on the I-495 Capital Beltway // Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland, 2010.
8. Coordination of Freeway Ramp Meters and Arterial Traffic Signals Field Operational Test // Institute of Transportation Studies, California PATH Program, 2013.
9. Coordinated Freeway and Arterial Operations Handbook // FHWA, 2006.
10. Highway Traffic Operations and Freeway Management: State-of-the-Practice // U.S. department of transportation, report FHWA-OP-03-076, 2013.
11. Synthesis of Active Traffic Management Experiences in Europe and the United States // FHWA, 2010.
12. Active Traffic Management for Arterials // National Cooperative Highway Research Program, 2013.
13. Inter-jurisdictional Coordination for Traffic Management in "Large City Technical Exchange and Assistance Program" // New York University, 2000.
14. Баран, О. І., & Андрашко, Ю. В. (2024). Динамічні моделі оптимізації транспортних потоків. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Математика і інформатика», 45(2), С. 139-152.
15. Hiroki Sayama. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. - Open SUNY Textbooks, Milne Library. State University of New York at Geneseo, 2015. - 498p.
16. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія / В. Д. Мигаль. Х.: Майдан, 2018. 262 с.
17. Cooper, W. W. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software / W. W. Cooper, L. M. Seiford, K. Tone. - Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. - 318 p.
18. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Application / A. Charnes, W. W. Cooper, A. Y. Lewin, L. M. Seiford. - Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994. - 513 pp.
19. Charnes, A. Measuring the Efficiency of Decision-Making Units / A. Charnes, W. W. Cooper, E. Rhodes // European Journal of Operational Research. - 1978. - Vol. 2. - P. 429-444.
20. Grossi, G. National Tourism Policy/ G. Grossi, A. Scappini//Analytical Frameworkfor the Evaluation of Efficiency and Effectiveness: The Case of Itali University della SvizzeraItaliana 2010. P. 85.

REFERENCES

1. National transport strategy of Ukraine for the period up to 2030. Approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 27, 2024 No. 1550.
2. US Public Law 105-178 Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21), 1998.
3. History of Intelligent Transportation Systems // U.S. department of transportation, report FHWA-JPO-16-329, 2016.
4. Nefedova Ya.I., Mnatsakanyan M. S. Modeling of city-logistic systems of transport flows under the influence of uncertainty factors // V International Scientific Conferens. II International Symposium of Young Researchers. - Katowice: Silesian University of Technology, 2013. - P. 493-501.
5. ITMS Operational Test of Advanced Traffic Management and Traveler Information Systems in the Twin Cities Metropolitan Area // Minnesota Department of Transportation, 1992.
6. Ma J. An efficiency-Equity Solution to The Integrated Transportation Corridor Control Design Problem // University of California, 2008
7. Integration of Off-ramp and Arterial Signal Controls to Minimize the Recurrent Congestion on the I-495 Capital Beltway // Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland, 2010.
8. Coordination of Freeway Ramp Meters and Arterial Traffic Signals Field Operational Test // Institute of Transportation Studies, California PATH Program, 2013
9. Coordinated Freeway and Arterial Operations Handbook // FHWA, 2006
10. Highway Traffic Operations and Freeway Management: State-of-the-Practice // U.S. department of transportation, report FHWA-OP-03-076, 2013
11. Synthesis of Active Traffic Management Experiences in Europe and the United States // FHWA, 2010.
12. Active Traffic Management for Arterials // National Cooperative Highway Research Program, 2013.
13. Inter-jurisdictional Coordination for Traffic Management in "Large City Technical Exchange and Assistance Program" // New York University, 2000.
14. Baran, O. I., & Andrashko, Yu. V. (2024). Dynamic models of optimization of transport flows. Scientific Bulletin of Uzhgorod University. Series "Mathematics and Informatics", 45(2), 139-152.
15. Hiroki Sayama. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. — Open SUNY Textbooks, Milne Library. State University of New York at Geneseo, 2015. - 498p.
16. Mygal V. D. Intelligent systems in technical operation of cars: monograph / V. D. Mygal. Kh.: Maidan, 2018. 262 p.
17. Cooper, W. W. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software / W. W. Cooper, L. M. Seiford, K. Tone. - Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. - 318 p.
18. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Application / A. Charnes, W. W. Cooper, A. Y. Lewin, L. M. Seiford. - Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994. - 513 pp.
19. Charnes, A. Measuring the Efficiency of Decision-Making Units / A. Charnes, W. W. Cooper, E. Rhodes // European Journal of Operational Research. – 1978. – Vol. 2. – P. 429–444.
20. Grossi, G. National Tourism Policy/ G. Grossi, A. Scappini//Analytical Frameworkfor the Evaluation of Efficiency and Effectiveness: The Case of Itali University della SvizzeraItaliana 2010. P.85.

M. Handziuk Search for optimal solutions in heterogeneous dynamic road transport systems.

The task of increasing the efficiency of road freight transportation is of particular relevance in modern economic conditions, which are defined as dynamically unstable and with a high degree of uncertainty in information situations of forecasting the development of the industry. A key element in the organization of the transport process of road freight transportation is the routing of rolling stock as a set of procedures for selecting the optimal characteristics of the route of movement, which determine the effectiveness of their organization in operational planning of transportation.

The routing task becomes especially relevant when the distribution of cargo flows is multivariate and multifaceted in dynamically changing conditions. In this case, the task of optimal routing can be solved only on the basis of the development of a specialized mathematical apparatus - an analytical tool for making effective decisions.

Therefore, it can be argued that the problem of optimizing routing processes in a dynamically changing environment, which is in demand in practice, is one that requires a systematic solution in dynamically changing conditions of operational planning of road freight transportation. This will allow for a systematic management of commercial operation of rolling stock of freight transport enterprises, taking into account dynamically changing criteria and factors.

Keywords: operational planning, heterogeneous dynamic transport system (HDTs), freight road transportation (FRT), routing, multi-criteria optimization, intelligent transport systems, mathematical modeling, DEA (Data Envelopment Analysis) method, efficiency, information uncertainty, digital control algorithms.

ГАНДЗЮК Микола Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: Gandzyuk64.MG@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-3552-4256>.

Mykola HANDZIUK, Ph.D in Engineering, associate professor of automobiles and transport technologies department, Lutsk National Technical University, e-mail: Gandzyuk64.MG@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-3552-4256>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1721

Глиняний В.С., Цимбал С.В.
Вінницький національний технічний університет

ПРОБЛЕМНІ АСПЕКТИ ТА НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У статті проведено комплексний аналіз сучасного стану пасажирських перевезень в Україні, зосереджуючи увагу на ключових проблемах, що стримують ефективний розвиток цієї галузі. Зокрема, детально розглянуто такі проблеми, як застаріла матеріально-технічна база та інфраструктура, що значно обмежує можливості щодо забезпечення безпечних, комфортних та швидких перевезень населення. Зношеність рухомого складу, недостатній рівень комфорту та сервісу, відсутність належних умов для людей з обмеженими можливостями є чинниками, що негативно впливають на рівень задоволеності користувачів транспортних послуг.

У межах роботи визначено стратегічні напрями вдосконалення системи пасажирських перевезень в Україні. Зокрема, обґрунтовано доцільність впровадження інноваційних логістичних рішень, які передбачають цифровізацію процесів перевезень, автоматизацію документообігу, створення єдиної платформи для бронювання, оплати та моніторингу транспортних послуг. Запропоновано розвивати мережу маркетинго-логістичних центрів, що дозволить оптимізувати планування маршрутів, забезпечити зручне стикування різних видів транспорту, організовувати міжрегіональні та міжнародні перевезення на якісно новому рівні.

У статті також запропоновано низку практичних заходів, спрямованих на підвищення конкурентоспроможності транспортних підприємств, зокрема оновлення рухомого складу, запровадження систем лояльності для пасажирів, удосконалення системи підготовки та перепідготовки персоналу, впровадження екологічно чистих видів транспорту. Визначено, що сталий розвиток пасажирських перевезень в Україні можливий лише за умови активної взаємодії держави, бізнесу та громадськості, а також комплексного підходу до модернізації транспортної системи в умовах сучасних економічних, соціальних та технологічних викликів.

Ключові слова: пасажирські перевезення, транспортна логістика, якість обслуговування, інновації, цифровізація, стратегічне управління, конкурентоспроможність, інфраструктура.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку економіки та суспільства пасажирські перевезення займають важливе місце в системі транспортної інфраструктури. Вони забезпечують мобільність населення, сприяють розвитку ділових, соціальних, культурних та туристичних зв'язків як усередині країни, так і за її межами. Забезпечення якісного транспортного обслуговування населення є одним із ключових чинників формування конкурентоспроможного національного ринку транспортних послуг, створення сприятливих умов для соціально-економічного розвитку регіонів та підвищення якості життя населення.

Особливу роль пасажирські перевезення відіграють в умовах урбанізації, зростання населення міст та активізації міжрегіональних і міжнародних комунікацій. Від якості організації пасажирських перевезень значною мірою залежать комфорт, безпека та швидкість пересування громадян, що, у свою чергу, впливає на загальний рівень соціальної активності, економічної мобільності та доступності послуг. Саме тому ефективне функціонування системи пасажирських перевезень є важливою складовою транспортної політики держави.

Проте сучасний стан пасажирських перевезень в Україні характеризується низкою проблем, які потребують комплексного вирішення. Зокрема, однією з головних проблем є технічна зношеність рухомого складу, що призводить до зниження безпеки, комфорту та регулярності перевезень. Значна частина транспорту, особливо на міських та міжміських маршрутах, експлуатується понад встановлені нормативні строки, що погіршує якість надання послуг і негативно впливає на екологічний стан довкілля через підвищені викиди шкідливих речовин.

Ще одним суттєвим викликом є недостатній рівень сервісу на пасажирському транспорті, що проявляється у низькій якості обслуговування пасажирів, відсутності сучасних інформаційних систем, нерегулярності руху, обмежених можливостях для осіб з інвалідністю та інших маломобільних груп населення. Крім того, пасажирів стикаються з обмеженим доступом до онлайн-сервісів бронювання та придбання квитків, відсутністю інтегрованих маршрутних мереж і єдиного електронного квитка, що суттєво знижує зручність користування громадським транспортом [1].

До проблемних аспектів слід віднести також нерозвиненість інфраструктури, зокрема недостатню кількість сучасних автостанцій, вокзалів, зупинок, терміналів пересадки, відсутність об'єднаних транспортно-логістичних хабів, що поєднують різні види транспорту. Нерівномірний

розвиток транспортної мережі та низький рівень інтеграції між міськими, приміськими та міжміськими перевезеннями ускладнює забезпечення належного транспортного сполучення, особливо в сільській місцевості та віддалених регіонах.

Окремої уваги заслуговують екологічні проблеми, які посилюються через використання застарілих транспортних засобів із низькими екологічними стандартами. Підвищене забруднення повітря у містах, шумове навантаження, збільшення викидів парникових газів є наслідком несвоєчасного оновлення рухомого складу та недостатнього впровадження екологічно безпечних видів транспорту, зокрема електробусів, тролейбусів та інших альтернативних засобів перевезення.

Важливим аспектом є необхідність адаптації транспортної системи України до європейських стандартів та сучасних технологій управління пасажирськими перевезеннями. На сьогодні Україна активно інтегрується до європейського транспортного простору, що вимагає оновлення нормативно-правової бази, удосконалення стандартів безпеки, модернізації інфраструктури, запровадження інтелектуальних транспортних систем та систем автоматизованого диспетчерського управління.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває питання виявлення основних проблем, що стримують розвиток пасажирських перевезень, та визначення перспективних напрямів їх вдосконалення. Потребує впровадження комплексний підхід до організації перевезень, який передбачає врахування транспортних потреб населення, економічної доцільності, екологічної безпеки та соціальної доступності. Важливим є також розроблення довгострокових програм розвитку пасажирського транспорту, оновлення парку транспортних засобів, підвищення якості обслуговування пасажирів, удосконалення системи управління перевезеннями на основі сучасних інформаційних технологій.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Питання організації та розвитку пасажирських перевезень є предметом дослідження багатьох вітчизняних і зарубіжних науковців. Вони висвітлюють різні аспекти функціонування транспортної системи, організації пасажирських перевезень, удосконалення логістичних схем та підвищення якості надання послуг.

У науковій літературі виділяються основні напрями досліджень у цій сфері:

- аналіз економічної ефективності пасажирських перевезень;
- розробка сучасних логістичних моделей і маршрутних мереж;
- впровадження інформаційно-комунікаційних технологій у сфері транспортного обслуговування;
- дослідження соціальних і екологічних аспектів функціонування пасажирського транспорту.

Крім того, літературні джерела вказують на те, що в умовах євроінтеграційних процесів постає необхідність адаптації української транспортної системи до вимог Європейського Союзу. Це стосується як технічного переоснащення, так і впровадження єдиних стандартів безпеки, екології та організації транспортного процесу [2].

Аналіз наукових праць дозволяє зробити висновок, що проблеми пасажирських перевезень мають комплексний характер і потребують системного підходу до їх вирішення. Важливо не лише модернізувати рухомий склад і інфраструктуру, а й удосконалювати управлінські, економічні та організаційні механізми в цій сфері.

На підставі опрацьованих джерел можна сформулювати основну проблему дослідження: потреба у розробці ефективних заходів з удосконалення пасажирських перевезень, які забезпечать підвищення якості, доступності, безпеки та екологічності транспортного обслуговування населення.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціллю даного дослідження є визначення основних проблемних аспектів, що стримують розвиток пасажирських перевезень, та обґрунтування напрямів їх удосконалення з метою підвищення якості, безпеки, доступності та ефективності надання транспортних послуг населенню.

Для досягнення поставленої цілі в роботі передбачено виконання таких завдань:

- 1.Провести аналіз наукових джерел, нормативно-правових документів та статистичних даних щодо сучасного стану пасажирських перевезень.
- 2.Визначити основні проблемні аспекти, що впливають на якість та ефективність організації пасажирських перевезень.
- 3.Оцінити вплив технічного стану рухомого складу, стану інфраструктури та рівня сервісного обслуговування на стан транспортної системи.
- 4.Виявити соціальні, економічні та екологічні фактори, що супроводжують функціонування пасажирських перевезень.

5. Сформулювати практичні рекомендації та напрями вдосконалення організації пасажирських перевезень з урахуванням сучасних потреб суспільства, європейських стандартів та інноваційних технологій.

Виконання зазначених завдань дозволить комплексно оцінити проблеми та визначити шляхи покращення пасажирських перевезень, що сприятиме розвитку транспортної галузі та підвищенню мобільності населення.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У світі важливою складовою галузі транспорту є пасажирський транспорт. Його головне завдання полягає у забезпеченні потреб населення у перевезеннях. Пасажири можуть користуватися послугами громадського транспорту з кількох причин, таких як необхідність переміщення з дому до роботи, громадських місць (поліклініка, школа, садок тощо). З часом розвивається інфраструктура, створюються нові поселення, а отже, змінюється транспортна рухливість мешканців, а також середня дальність поїздки. Для забезпечення пасажирів необхідним рівнем якості послуг, що надаються, важливо розвивати і вдосконалювати пасажирські перевезення. Але на шляху вдосконалення пасажирського транспорту є низка протиріч та проблем, що заважають його розвитку. Дані проблеми, які з 4 основних напрямів, необхідно вирішувати лише на рівні держави. До цих напрямів належать: правові основи діяльності, організація та фінансування діяльності, інвестиції у пасажирський транспорт та організація управління.

В даний час акти, що регулюють діяльність пасажирського транспорту роз'єднані, суперечливі і не відображають сучасної реальності. У зв'язку з цим, з питань надання послуг з перевезення пасажирським транспортом збільшується кількість протестів у наглядових органах та судових розглядах [3].

Також порушено процес функціонування основних фондів пасажирського транспорту, недостатні темпи оновлення рухомого складу та сильну зношеність. Відбувається їхнє активне старіння. Зростає обсяг сходів з лінії транспортних засобів за технічними несправностями та знижується рівень технічної надійності та безпеки пасажирського транспорту. Інвестування підприємств пасажирського транспорту із використанням сучасних механізмів практично відсутнє. Витрати під час використання рухомого складу, і навіть собівартість перевезень пасажирів збільшуються. У цій галузі склалися такі основні проблеми:

- недостатній обсяг виділених бюджетних коштів для оновлення та відтворення виробничих фондів пасажирського транспорту. Оскільки знижується рівень бюджету, відбувається зниження обсягів оновлення рухомого складу. Підприємства використовують старий рухомий склад, який через великий вік часто ламається, а отже, не виконується запланований обсяг пасажирських перевезень. Також зростають витрати на придбання запасних частин для ремонту транспортних засобів;

- немає налагодженого механізму підтримки державою пасажирського транспорту, що веде до погіршення якості надання послуг, оскільки відсутня можливість приведення у належний вид транспортних засобів. Щоб вирішити цю проблему, державі необхідно налагодити процес підтримки підприємств пасажирського транспорту у сфері організації управління та фінансування;

- збільшення транспортної рухливості населення, в умовах скорочення провізних можливостей призводить до зростання наповнюваності салонів, а також до неможливості охоплення існуючого пасажиропотоку в повному обсязі. Цю проблему можна вирішити з допомогою збільшення транспортної роботи певних маршрутах. Для цього також потрібне придбання нового рухомого складу;

- немає фінансових, організаційних та правових умов залучення приватних інвестицій у розвиток та модернізацію пасажирського транспорту. Для покращення роботи пасажирського транспорту необхідно встановити сприятливі умови залучення інвестицій як вітчизняних, так і зарубіжних. Це сприятиме швидшому розвитку пасажирського транспорту;

- немає можливості оцінки потреб у інвестиціях, оскільки відсутні соціальні стандарти транспортної забезпеченості населення. Що позбавляє можливості залучення додаткового капіталу як інвестицій сторонніх компаній. При вирішенні цієї проблеми підприємствам необхідно встановити свої потреби залучення інвестицій;

- низька якість техніко-експлуатаційних показників транспортних засобів, що випускаються українськими виробниками. Українські виробники рухомого складу мають малий досвід зі збирання транспортних засобів, а також немає фахівців необхідного рівня знань у цій сфері. Виробникам необхідно наймати кваліфікованіший персонал або провести перенавчання наявного.

У правовій області встановилися такі основні протиріччя:

– органи влади всіх рівнів не мають розмежувань компетенції, предметів ведення та повноважень у сфері пасажирського транспорту, тому при виникненні деяких ситуацій виникає проблема віднесення питання щодо рівня влади. Потрібне чітке розмежування обов'язків окремих органів влади, яке можна встановити за допомогою ухвалення спеціального закону;

– скорочення виділення коштів із бюджету з оплати проїзду пільгової категорії громадян, не скоєно механізм надання встановлених у країні пільг. Щоб вирішити цю проблему необхідно збільшити величину виділення коштів бюджету для можливості повернення всіх існуючих пільг по проїзду;

– в органів місцевого самоврядування немає чіткого змісту діяльності з організації транспортного обслуговування населення, що заважає контролю за діяльністю організації та дотримання її правових засад. Для контролю діяльності підприємств пасажирського транспорту та дотриманням її правових засад необхідно встановлення компетенцій для кожної організації;

– існуючі форми державної підтримки не встановлені за напрямками пасажирського транспорту, що веде до можливості неправильного встановлення напряму державної підтримки. Для уникнення неправильного спрямування державної підтримки необхідно встановити можливі форми та напрями підтримки;

– не встановлено відшкодування витрат підприємствам з обслуговування пасажирів на маршрутах за нерегульованими тарифами в умовах самофінансування та самоокупності, на цих маршрутах фінансування відбувається лише і власними коштами підприємства. Рішенням може бути розробка способів і можливостей відшкодування витрат, яких саме умовах це можливо;

– не встановлено загальних підходів до організації та здійснення перевезень пасажирів. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити та здійснити впровадження загальних підходів організації пасажирських перевезень [4].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Організація та способи фінансування діяльності підприємств пасажирського транспорту є неефективними. до накопичення заборгованостей, незадовільного фінансового стану підприємств пасажирського транспорту веде принцип відшкодування одержаних збитків підприємств у межах обмежених можливостей відповідних бюджетів.

Суперечності, що склалися в галузі фінансування пасажирських перевезень, полягають у наступному:

– завищення або заниження тарифів порівняно з собівартістю перевезень, що призводить до збитку для підприємства при зниженні тарифу та втрати пасажирів при завищенні, а також може сприяти більш активному розвитку тіньової економіки. Необхідне державне регулювання цієї проблеми, встановлення певних нормативів, але які спиратимуться підприємства;

– неефективні методи контролю за отриманою на маршруті виручкою, а відтак зростає і кількість пасажирів, що уникають оплати проїзду. Ця проблема веде до втрати отримання виручки у повному обсязі. Необхідно розробити ефективні методи контролю отриманих доходів, серед яких можуть бути більш часті перевірки спеціальним відділом;

– компенсації витрат підприємств на перевезення пільгових категорій пасажирів з бюджетів усіх рівнів не покривають пов'язаних із цим доходів, що випадають. Кошти за випадаючими доходами компенсує підприємству держава, але здебільшого над повному обсязі, щомісяця виявляються відхилені транзакції здійсненим поїздкам;

– не проводиться компенсація витрат підприємств, пов'язаних з роботою за прийнятими урядом зниженими тарифами в порівнянні з собівартістю перевезень, а також на соціально важливих маршрутах або в окремі проміжки часу з низькими пасажиропотоками. В даний час політика держави будується на забезпеченні доступності пасажирських перевезень у всіх населених пунктах, але не розроблено процес коригування компенсацій за маршрутами, що мають соціальну значущість (єдиний спосіб проїзду), але водночас і низький рівень пасажиропотоку. Для даних маршрутів необхідно встановити можливість покриття збитків, що виникають;

– немає систем об'єктивного контролю обсягу наданих послуг та непрозорості фінансових потоків. Усе це дозволяє застосовувати методи неупередженої оцінки отриманих збитків на пасажирському транспорті, зокрема у зв'язку з перевезеннями пільгових категорій громадян, тобто. відсутня мотивація зменшення витрат за перевезення пасажирів на муніципальних маршрутах, обслуговуваних підприємствами, за умов суспільної монополії;

- Не розроблені методи, пов'язані з компенсацією витрат при перевезенні пільгових категорій пасажирів з бюджетів усіх рівнів, що не допускають неналежного використання бюджетних переказів. У зв'язку з цим необхідно розробити ефективні способи компенсації збитків [5].

У потрібній мірі інституційними змінами не підтверджено операції державного та муніципального управління роботи пасажирського транспорту. Існуючі та розроблювані органи управління часто недостатньо ефективно взаємодіють між собою і не мають точних розмежувань влади.

У сфері інституційної організації управління виявлено такі протиріччя:

- не закінчено процес передачі з федерального рівня на державний та рівні суб'єктів власності пасажирського транспорту, що веде до плутанини у повноваженнях суб'єктів держави. При закінченні цього процесу представлена проблема буде вирішена;

- немає устрою продуктивного управління державною та муніципальною власністю на пасажирському транспорті. Необхідно проаналізувати найбільш успішні способи управління власністю, а потім впровадити найефективніший метод;

- не встановлена система органів державного та муніципального регулювання пасажирського транспорту, яка здатна забезпечувати його постійне функціонування та розвиток, що веде до втрати контролю стану пасажирського транспорту;

- з управління пасажирськими перевезеннями не завершено формування необхідних структур, не знаходять розвитку інформаційно-управлінські системи. Необхідно завершити процес формування структур для розвитку пасажирських перевезень;

- найбільшу владу має на пасажирському транспорті унітарне підприємство, в межах якого не просувається ефективна господарська діяльність, зростання накопичень та інвестиційна активність, а також на підприємстві використовується старий рухомий склад. Для вирішення проблеми необхідне перебудова господарської діяльності підприємства, а згодом та оновлення рухомого складу;

- немає необхідного і достатнього досвіду організації та управління пасажирським транспортом в органах державного та муніципального управління для змін в області пасажирського транспорту, а також вони не мають достатніх кадрових ресурсів. Це значно знижує якість управління. Для вирішення цієї проблеми необхідно організувати пошук фахівців потрібного рівня.

Система управління пасажирським транспортом через суперечливість законодавства нині міститься на домовленостях між транспортними адміністраціями, контрольно-наглядовими органами та перевізниками. В результаті виникає нестійка рівновага інтересів. Тому однією з основних проблем розвитку пасажирського транспорту залишається законодавство [6].

Для поліпшення сформованих обставин міністерство транспорту працює над основними федеральними законами у сфері пасажирського транспорту, і навіть правками до них.

Також потрібні рішення та інші завдання, серед яких створення інформаційно-аналітичної системи управління громадським транспортом, покращення тарифної політики, формування єдиної маршрутної мережі та її оптимізація, спостереження стану громадського транспорту, створення системи диспетчерського управління громадським транспортом, зниження шкідливого впливу пасажирського транспорту на довкілля. Зазначені завдання пасажирського транспорту необхідно вирішувати комплексним підходом [7].

Щоб підвищити якість застосовуваної тарифної політики необхідно створити ефективний метод, який враховуватиме соціальну значущість транспортних послуг та поєднання елементів ринкового та державного регулювання ринку. Застосування цієї політики необхідне, оскільки підприємства мають бути прибутковими з допомогою ефективнішої роботи, а чи не з допомогою підвищення тарифів. Але при цьому необхідно також керуватися законами та актами у галузі тарифоутворення.

На пасажирському транспорті нині існує низка серйозних проблем, які потребують свого вирішення. Однією з них є необхідність проведення зміни щодо вдосконалення та розвитку пасажирських послуг, оскільки транспорт має велике значення для розвитку економічного стану країни. Завдяки добре розвиненій транспортній системі відбувається розвиток виробничої структури діяльності держави.

Всі представлені протиріччя, проблеми та шляхи їх вирішення мають велике практичне значення для розвитку пасажирського транспорту.

Пасажирські перевезення є однією з основних складових транспортної інфраструктури країни. Враховуючи сучасні проблеми цієї сфери, важливо розглянути конкретні напрями вдосконалення, які

дозволять підвищити ефективність роботи транспортної системи, покращити якість обслуговування пасажирів і забезпечити сталий розвиток галузі.

Одним із основних напрямів є оновлення рухомого складу пасажирського транспорту. Застарілі транспортні засоби не тільки мають низькі технічні характеристики, а й спричиняють підвищений рівень забруднення навколишнього середовища. Для покращення екологічної ситуації та забезпечення комфортного обслуговування пасажирів необхідно впроваджувати нові технології та інноваційні види транспорту, такі як електричні автобуси, тролейбуси, а також інші альтернативні джерела енергії (гібридні транспортні засоби). Це дозволить значно знизити шкідливі викиди та зменшити шумове забруднення в містах.

Інфраструктура пасажирських перевезень потребує суттєвого оновлення. Одним із важливих кроків є створення інтегрованих транспортних хабів, які об'єднують різні види транспорту, зокрема міський, приміський, міжміський транспорт, а також залізничний та авіаційний. Такі хаби повинні бути обладнані сучасними терміналами, зручними зупинками, зонами для відпочинку пасажирів, а також системами для обміну даними та моніторингу перевезень. Розвиток і модернізація інфраструктури аеропортів, залізничних вокзалів та автостанцій дозволить підвищити якість обслуговування пасажирів, зменшити час на пересадки та покращити доступність транспортних послуг.

Інтеграція сучасних інформаційних технологій у процес надання транспортних послуг є необхідним кроком для забезпечення зручності та ефективності. Впровадження єдиного електронного квитка дозволить не тільки спростити процес купівлі квитків, а й зробити систему перевезень більш прозорою та ефективною. Платформи для онлайн-бронювання квитків, інтеграція мобільних додатків для моніторингу руху транспорту та доступу до актуальної інформації дозволить знизити навантаження на каси та створити умови для пасажирів, щоб вони могли планувати свої подорожі з максимальним комфортом.

Важливим напрямом є оптимізація маршрутної мережі, яка повинна відповідати реальним потребам населення. Розробка нових маршрутів, особливо в сільській місцевості та віддалених регіонах, а також коригування існуючих напрямків дозволить покращити доступність пасажирських перевезень. Оновлення маршрутної системи з урахуванням попиту на перевезення та змін у демографічній ситуації дасть змогу знизити час у дорозі та зменшити кількість порожніх рейсів. Також важливим є удосконалення графіків руху транспорту для зменшення інтервалів між рейсами у години пік та забезпечення регулярності перевезень.

Покращення якості обслуговування пасажирів на всіх етапах перевезення є одним з основних напрямків для підвищення задоволеності користувачів транспортних послуг. Це включає не тільки оновлення умов транспорту (крісло, система кондиціонування, зручні сидіння), але й забезпечення кваліфікованого обслуговування, а також створення умов для безпеки пасажирів (камери спостереження, контролери). Впровадження систем моніторингу та управління пасажиропотоками в реальному часі також є важливим етапом для підвищення комфорту.

Для розвитку пасажирських перевезень необхідно залучати приватний бізнес до інвестування в інфраструктуру та розвиток транспортної системи. Механізми державно-приватного партнерства можуть сприяти впровадженню інноваційних технологій, модернізації транспортного парку та покращенню інфраструктури. Це дозволить знизити навантаження на бюджет та забезпечити більш ефективне управління транспортною сферою.

Одним із важливих напрямків є також інтеграція екологічно безпечних транспортних технологій, таких як електричні автобуси, зарядні станції для електричних автомобілів, а також зниження рівня забруднення навколишнього середовища від транспортної діяльності. Підвищення уваги до екологічної безпеки дозволить забезпечити стійкий розвиток міської транспортної системи та знизити негативний вплив на навколишнє середовище.

Ці напрямки вдосконалення можуть бути використані для комплексного розвитку пасажирських перевезень в Україні, забезпечення їх ефективності та сталості у майбутньому.

ВИСНОВКИ

У результаті роботи було здійснено комплексний аналіз сучасного стану пасажирських перевезень в Україні, що дозволило виявити низку системних проблем, які суттєво знижують ефективність функціонування цієї галузі та якість надання транспортних послуг населенню. Встановлено, що основними проблемами залишаються: технічна зношеність рухомого складу, незадовільний стан транспортної інфраструктури, нераціональна структура маршрутної мережі,

невідповідність обсягів і якості перевезень сучасним потребам пасажирів, а також низький рівень сервісу та обслуговування.

Особливу увагу у дослідженні приділено аналізу факторів, які впливають на ефективність пасажирських перевезень. Серед них визначено як внутрішні (організаційно-економічні проблеми транспортних підприємств, застаріла система диспетчеризації, відсутність єдиної системи планування та управління перевезеннями), так і зовнішні (економічна нестабільність, зростання вартості паливно-мастильних матеріалів, відсутність належної державної підтримки галузі, конкуренція з боку приватних перевізників).

Науково обґрунтовано напрями вдосконалення системи пасажирських перевезень, серед яких визначено: впровадження електронної системи обліку пасажирів та оплати проїзду, створення єдиного інформаційно-диспетчерського центру, оптимізацію маршрутної мережі з урахуванням реальних потреб населення, оновлення рухомого складу з переходом на екологічно чистий транспорт, удосконалення системи тарифоутворення та розробку механізмів державної підтримки підприємств пасажирських перевезень.

Практична значущість проведеного дослідження полягає у тому, що його результати можуть бути використані органами державного управління, місцевого самоврядування, транспортними підприємствами та іншими зацікавленими сторонами для розробки стратегічних програм розвитку пасажирських перевезень, підвищення якості транспортного обслуговування населення, забезпечення сталого розвитку галузі та інтеграції України у європейський транспортний простір.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. — Режим доступу: https://mtu.gov.ua/files/For_site_NTSU-2030.pdf
2. Барановський О.І. Логістика пасажирських перевезень: навчальний посібник. — Київ: Ліра-К, 2021. — 248 с.
3. Гаврилюк В.О., Коваленко О.О. Організація пасажирських перевезень: сучасний стан та перспективи розвитку // Вісник економіки транспорту і промисловості. — 2023. — № 81. — С. 43–50.
4. State Statistics Service of Ukraine. Passenger transportation statistics for 2023. — Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>
5. Ковальчук С.Л. Проблеми та перспективи розвитку міських пасажирських перевезень в Україні // Економіка та держава. — 2022. — № 6. — С. 75–80.
6. Степаненко С.І. Управління транспортними системами: навчальний посібник. — Харків: ХНАДУ, 2020. — 312 с.
7. European Commission. EU transport in figures. Statistical pocketbook 2023. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.

REFERENCES

1. National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030. — Access mode: https://mtu.gov.ua/files/For_site_NTSU-2030.pdf
2. Baranovskyi O.I. Logistics of passenger transportation: a textbook. — Kyiv: Lira-K, 2021. — 248 p.
3. Gavrilyuk V.O., Kovalenko O.O. Organization of passenger transportation: current state and development prospects // Bulletin of the Economy of Transport and Industry. — 2023. — No. 81. — P. 43–50.
4. State Statistics Service of Ukraine. Passenger transportation statistics for 2023. — Access mode: <http://www.ukrstat.gov.ua>
5. Kovalchuk S.L. Problems and prospects for the development of urban passenger transportation in Ukraine // Economy and State. — 2022. — No. 6. — P. 75–80.
6. Stepanenko S.I. Transport systems management: a textbook. — Kharkiv: KhNADU, 2020. — 312 p.
7. European Commission. EU transport in figures. Statistical pocketbook 2023. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.

V.Glynianyi, S. Tsymbal., Problem aspects and directions for improvement of passenger transportation

The article provides a comprehensive analysis of the current state of passenger transportation in Ukraine, focusing on key problems that hinder the effective development of this industry. In particular, it examines in detail such problems as outdated material and technical base and infrastructure, which significantly limits the possibilities of ensuring safe, comfortable and fast transportation of the population.

Deterioration of rolling stock, insufficient level of comfort and service, lack of proper conditions for people with disabilities are factors that negatively affect the level of satisfaction of users of transport services.

The work identifies strategic directions for improving the passenger transportation system in Ukraine. In particular, it substantiates the feasibility of implementing innovative logistics solutions that provide for the digitalization of transportation processes, automation of document flow, and the creation of a single platform for booking, payment and monitoring of transport services. It is proposed to develop a network of marketing and logistics centers, which will allow optimizing route planning, ensuring convenient connection of different types of transport, organizing interregional and international transportation at a qualitatively new level.

The article also proposes a number of practical measures aimed at increasing the competitiveness of transport enterprises, in particular, updating rolling stock, introducing loyalty systems for passengers, improving the system of training and retraining of personnel, and introducing environmentally friendly types of transport. It is determined that the sustainable development of passenger transportation in Ukraine is possible only under the condition of active interaction of the state, business and the public, as well as an integrated approach to the modernization of the transport system in the conditions of modern economic, social and technological challenges.

Keywords: passenger transportation, transport logistics, quality of service, innovation, digitalization, strategic management, competitiveness, infrastructure.

ГЛИНЯНИЙ Віктор Сергійович – аспірант, аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: victorglin9@gmail.com

ЦИМБАЛ Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net

Viktor GLYNIANYI – graduate student, graduate student of the Department of Automobile and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: victorglin9@gmail.com

Serhii TSYMBAL – PhD in Engineering, associate professor, head of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net

DOI 10.36910/automash.v1i24.1722

Дембіцький В.М., Самостян В.Р.
Луцький національний технічний університет, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ АВТОТРАНСПОРТОМ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ЙОГО НАДІЙНОСТІ ТА ЯКОСТІ

У статті розглядаються теоретичні та прикладні аспекти оцінювання доцільності подальшої експлуатації автотранспортних засобів, що втратили частину свого технічного ресурсу внаслідок тривалої експлуатації. Особливу увагу приділено проблемі прийняття обґрунтованих рішень щодо продовження використання чи списання транспортних одиниць з урахуванням як технічного стану, так і економічної доцільності. У контексті зростання вартості нових транспортних засобів, підвищення цін на обслуговування та ремонт, а також необхідності оптимізації витрат на управління автопарком, актуальність даного дослідження зумовлена потребою в системному підході до оцінки ефективності експлуатації транспорту, що вже частково вичерпав свій ресурс.

У межах дослідження було запропоновано структуру методики оцінювання залишкового ресурсу автотранспортних засобів із врахуванням техніко-економічних показників. Виділено ключові параметри, що впливають на прийняття рішень, зокрема показники надійності, інтенсивності експлуатації та коефіцієнт технічної готовності. Узагальнено математичну модель, яка дозволяє формалізовано оцінити доцільність подальшої експлуатації конкретного транспортного засобу з урахуванням реальних експлуатаційних даних, а також здійснювати прогнозування ефективності подальшого використання транспортного засобу.

Окреслено перспективи подальших досліджень, серед яких – урахування зовнішніх чинників експлуатації, адаптація моделі до різних типів транспортних засобів, використання методів штучного інтелекту та машинного навчання для підвищення точності прогнозів технічного стану та ефективності експлуатації. Зазначене дослідження має практичну цінність для суб'єктів транспортної логістики, управлінців автопарками, а також науковців, які займаються питаннями ефективності технічної експлуатації транспорту.

Ключові слова: експлуатаційна доцільність, автотранспортні засоби, технічний ресурс, залишковий ресурс, техніко-економічна оцінка, ефективність використання, знос, ремонтпридатність, управління автопарком, математична модель, прийняття рішень, транспортна логістика.

ВСТУП

Надійність колісних транспортних засобів є одним з визначальних показників ефективності їх експлуатації. Протягом останніх років надійність автомобілів значно зросла, тритозатрати на технічне обслуговування зменшилися, в той же час значно зробили тритозатрати на ремонт автомобілів. За результатами аналізу процесів ремонту автомобілів різних марок встановлено, що збільшення цих тритозатрат пов'язано з ускладненням конструкції, необхідністю демонтажу додаткових елементів, необхідністю налаштування систем після ремонту, тощо [1], [2], [3].

Як свідчить проведений аналіз, значна частка робіт присвячена проблемам та питанням дослідження показників надійності [4], [5], [6], їх підвищення [7], [8], [9], моделювання технічного стану автомобіля [10], [11], [12], [13], [14].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Питанням надійності транспортних засобів в Україні займалися науковці Є. Форнальчик [15], [16], [17], Є. Хаврук [18], В. Аулін [19], [20], В. Канарчук [21] та інші [22], [23].

Очевидно, що з віком (пробігом) транспортного засобу зростатимуть затрати на здійснення технічних впливів, імовірність його виходу з ладу, тривалість простоїв в ремонті.

У роботі [3] авторами встановлено, що затрати на ремонт змінюються за експоненціальним законом, і зростають з віком транспортного засобу (рис. 1).

У роботі [24] на основі даних, зібраних зі станцій, які проводять перевірку технічного стану автомобілів, отримано розподіл несправностей автомобілів за віком (рис. 2, 3).

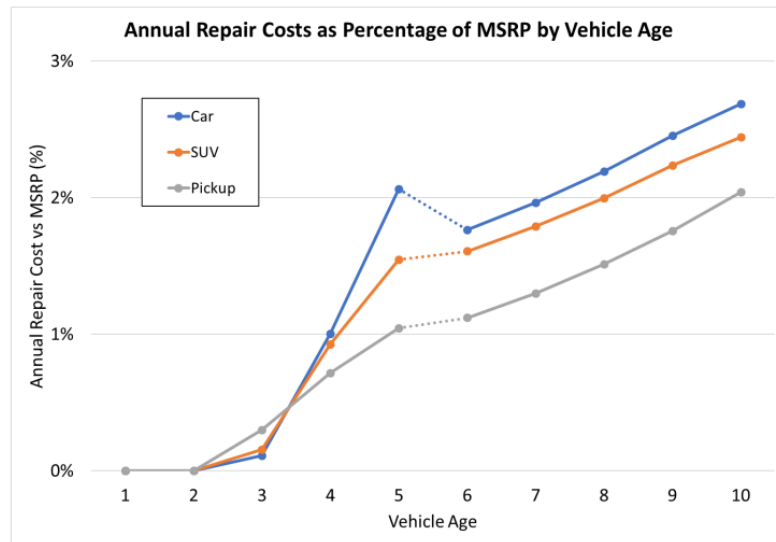


Рисунок 1 – Зміна витрат на ремонт автомобілів залежно від віку (за даними Edmunds TCO 2020 [3])

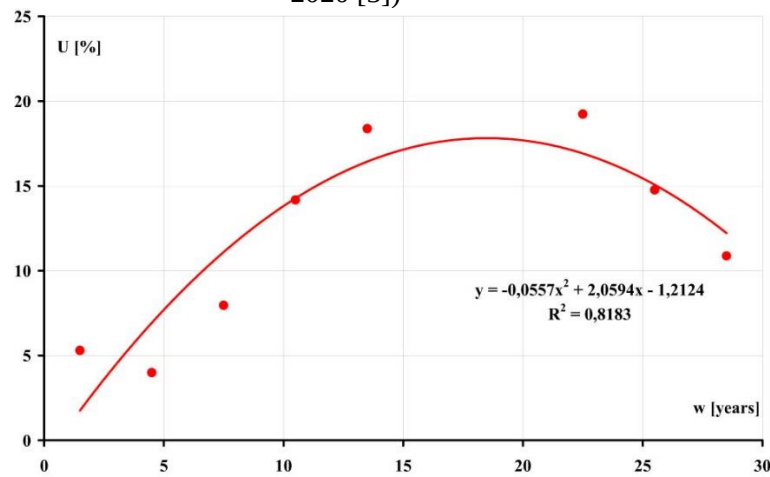


Рисунок 2 – Частка несправних автомобілів (за даними [24])

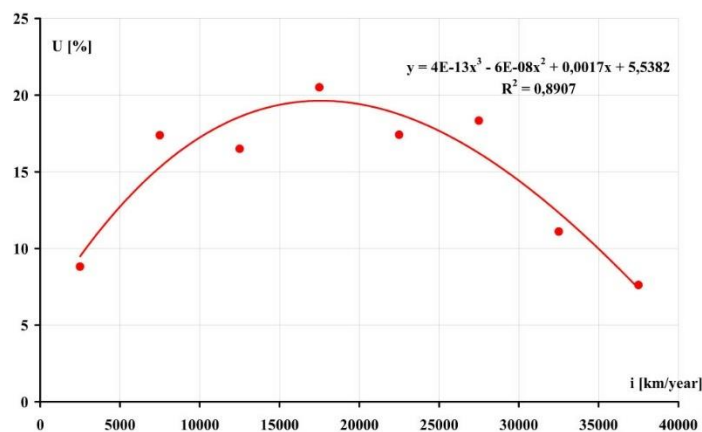


Рисунок 3 – Залежність частки несправних транспортних засобів серед транспортних засобів у заданому діапазоні інтенсивності експлуатації (за даними [24])

На основі проведеного огляду літературних джерел визначено ціль та задачі досліджень.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз змін показників надійності та ефективності експлуатації колісних транспортних засобів у процесі їхнього старіння, з урахуванням терміну їх експлуатації, а

також побудова аналітичної моделі для прогнозування цих показників протягом життєвого циклу транспортного засобу.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити характер змін коефіцієнтів ефективності експлуатації з урахуванням віку автомобіля;
- побудувати узагальнену математичну модель зміни показників надійності та ефективності експлуатації автомобіля у часі.
- запропонувати підходи до прогнозування технічного стану транспортних засобів на основі моделі.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

З метою оцінки ефективності використання транспортного засобу застосовуються наступні коефіцієнти [15]:

- коефіцієнт готовності (K_r), який характеризує ймовірність працездатності об'єкта у будь-який момент часу, впродовж якого передбачено його використання за призначенням, і визначається за залежністю:

$$K_r = \frac{T_{\text{пц}}}{T_{\text{пц}} + T_{\text{в}}} \quad (1)$$

де $T_{\text{пц}}$ – сумарна тривалість працездатного стану автомобіля;

$T_{\text{в}}$ – сумарна тривалість усунення відмов автомобіля;

- коефіцієнт оперативної готовності ($K_{\text{ог}}$), додатково до коефіцієнта K_r враховує простої автомобіля з організаційних причин ($T_{\text{орг}}$):

$$K_{\text{ог}} = \frac{T_{\text{пц}}}{T_{\text{пц}} + T_{\text{в}} + T_{\text{орг}}} \quad (2)$$

- коефіцієнт технічного використання $K_{\text{тв}}$, який характеризує відношення працездатного стану автомобіля до загального часу використання автомобіля:

$$K_{\text{тв}} = \frac{T_{\text{пц}}}{T_{\text{пц}} + T_{\text{то}} + T_{\text{рем}}} \quad (3)$$

де $T_{\text{то}}$, $T_{\text{рем}}$ – тривалість перебування автомобіля на технічному обслуговуванні та в ремонті.

- коефіцієнт збереження ефективності $K_{\text{е.в.}}$, який враховує зміну ефективності використання автомобіля, залежно від $T_{\text{пц}}$:

$$K_{\text{е.в.}} = \frac{W_{\text{р.ф.}}}{W_{\text{р.н.}}} \quad (4)$$

де $W_{\text{р.ф.}}$, $W_{\text{р.н.}}$ – відповідно фактичний та номінальний обсяг транспортної роботи. За номінальний обсяг транспортної роботи приймається, за умови $K_r = 1$, тобто приймається період, протягом якого не виникали відмови.

Вищенаведені коефіцієнти дуже добре допомагають охарактеризувати існуючий стан автомобільного парку. Однак, якщо розглядати питання прогнозування ефективності використання транспортних засобів, можуть виникнути проблеми з вибором показників, наприклад, час простою автомобілів в ремонті, тощо.

У 1990-х роках науковцями було запропоновано застосовувати коефіцієнти, які дозволяють здійснювати оцінку як окремого автомобіля, так і парку в цілому, використовуючи показники оцінки ефективності використання транспортних засобів на лінії. Оскільки, з віком автомобіля, затрати на ремонт змінюються за експоненціальним законом [3], то очевидно, що і ефективність використання транспортних засобів також підпорядковуватиметься цьому закону.

Несвицьким Я.І., Говорущенком М.Я., Кузнецовим Є.С. Прудковським Б.Д., доведено, що показник, який характеризує певний показник надійності автомобіля (K_a), можна описати залежністю:

$$K_a(t) = K_0 e^{\pm \beta t} \quad (5)$$

де $K_a(t)$ – значення показника на момент часу (t) експлуатації автомобіля або парку автомобілів;

K_0 – значення показника на момент початку експлуатації автомобіля або парку автомобілів;

β – коефіцієнт, який характеризує зміну K_a протягом терміну експлуатації транспортного засобу. Цей показник в літературі може називатися коефіцієнтом старіння автомобіля.

Знак $\pm$ у залежності (5) вказує відповідно на зростання або спадання показника. Наприклад з віком автомобіля витрати на ремонт транспортних засобів зростатимуть, натомість ефективність експлуатації автомобіля спадатиме.

В якості показника надійності автомобіля можуть використовуватися затрати на його обслуговування і ремонт, простої, пробіг, тощо.

В такому випадку, використовуючи залежність (5), коефіцієнт технічного використання автомобіля (K_{TB}) буде визначатися:

$$K_{TB}(t) = K_{TB}^0 e^{-\beta t} \quad (6)$$

де $K_{TB}(t)$ – значення коефіцієнта технічного використання на момент часу (t) експлуатації автомобіля;

K_{TB}^0 – значення коефіцієнта технічного використання на момент початку експлуатації автомобіля;

β – коефіцієнт, який характеризує зміну K_{TB} протягом терміну експлуатації транспортного засобу.

Тоді, в початковий момент експлуатації автомобіля, коефіцієнт технічного використання рівний 1, то:

$$K_{TB}(t) = e^{-\beta t} \quad (7)$$

Зміна коефіцієнту технічного використання автомобіля або автомобільного парку може бути представлена у вигляді графіка, наведеного на рисунку 4.

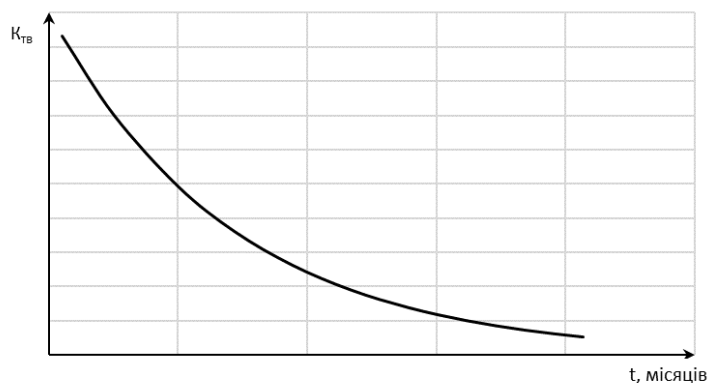


Рисунок 4 – Зміна коефіцієнту технічного використання автомобіля в процесі його експлуатації

Коефіцієнт технічного використання в процесі експлуатації автомобіля змінюється, що свідчить про зниження надійності автомобіля та, відповідно, ефективності його експлуатації (рис. 4). В решті, подальша експлуатація транспортного засобу буде недоцільною, тому автомобіль буде або

направлено на капітальний ремонт або на списання. Ці дві події вважаються завершенням експлуатаційного циклу автомобіля, тобто при досягненні коефіцієнта технічного використання автомобіля певного значення K_{TE}^{min} , яке відповідає часу експлуатації t^{max} подальша експлуатація припиняється (рис. 5).

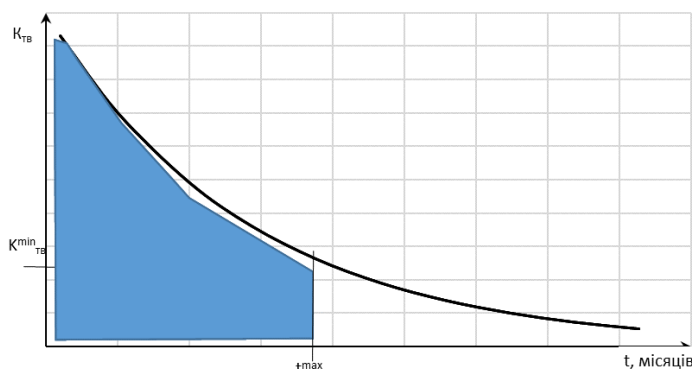


Рисунок 5 – Мінімальне значення коефіцієнту технічного використання автомобіля

Щодо часу експлуатації транспортного засобу t^{max} , то значення даного показника доцільно приймати відповідно до граничного терміну використання автомобіля, згідно прийнятої моделі нарахування амортизації [25, 26, 27, 28, 29]. Відповідно до пункту 145.1 статті 145 Податкового кодексу України мінімально допустимий строк корисного використання транспортних засобів, встановлений 5 років.

Несвицьким Я.І., Говорущенком М.Я., Кузнецовим Є.С. Прудковським Б.Д. встановлено залежність між мінімальним значенням коефіцієнту технічного використання автомобіля та значенням цього ж коефіцієнта на момент часу (t) експлуатації автомобіля:

$$\overline{K_{TE}} = \frac{1 - K_{TE}^{min}}{-\ln(K_{TE}^{min})} \quad (8)$$

або (див. рис. 6):

$$K_{TE}^{min} = 0,9634(\overline{K_{TE}})^2 + 0,1665\overline{K_{TE}} - 0,1217 \quad (9)$$

$$\overline{K_{TE}} = 0,2821(K_{TE}^{min})^2 + 0,9377K_{TE}^{min} + 0,3236 \quad (10)$$

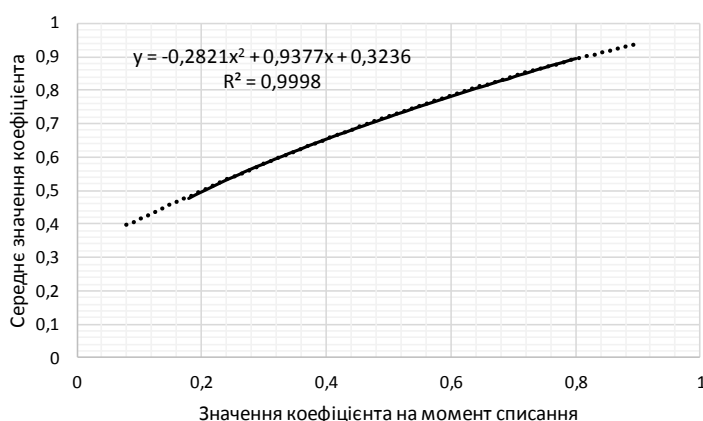


Рисунок 6 – Залежність середнього значення коефіцієнта технічного використання автомобіля $\overline{K_{TE}}$, залежно від значення цього коефіцієнта під час списання

Оперуючи значеннями коефіцієнта технічної готовності можливо спрогнозувати експлуатаційні показники окремого автомобіля або парку автомобілів протягом їх періоду експлуатації.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ефективність запропонованого підходу щодо коефіцієнтів технічного використання автомобілів досить добре можна продемонструвати на прикладі. Нехай на деякому АТП експлуатуються автомобілі однієї марки. Середньодобовий пробіг автомобіля становить $L_{\text{сд}}$ км, пробіг до капітального ремонту - $L_{\text{кр}}$. Необхідно визначити ефективність експлуатації автомобілів, якщо термін експлуатації автомобіля до його списання становить $T_{\text{сп}}$. Для розрахунків прийнято вихідні дані: $L_{\text{сд}} = 345$ км, $L_{\text{кр}} = 450$ тис. км, $T_{\text{сп}} = 5$ років = 60 місяців.

Оскільки, найбільш доцільним є визначення ефективності експлуатації автомобіля в розрізі місяців, то середньомісячний пробіг автомобіля становитиме:

$$L_{\text{см}} = L_{\text{см}} D_{\text{рн}} \quad (11)$$

де $D_{\text{рн}}$ – дні роботи автомобілів протягом місяця (при п'ятиденному робочому тижні рекомендовано приймати 22 дні, при шестиденному – 26 днів, при семиденному – 30 днів).

Тоді, з метою оцінки динаміки зміни основних показників, які характеризують надійність автомобіля та ефективність його експлуатації на АТП, на першому етапі визначається середній коефіцієнт технічного використання автомобіля за весь період його експлуатації:

$$\overline{K_{\text{тв}}} = \frac{L_{\text{кр}}}{L_{\text{см}} T_{\text{сп}}} \quad (12)$$

З врахуванням значень вихідних даних, наведених вище, з врахуванням семиденного робочого тижня (характерно для автобусів, які здійснюють перевезення пасажирів), отримано $L_{\text{см}} = 10,4$ тис. км, $\overline{K_{\text{тв}}} = 0,7211$.

За графіком, наведеним на рисунку 6, або за залежністю (9) визначається мінімальний коефіцієнт технічного використання автомобіля, на момент завершення експлуатації. В даному випадку $K_{\text{тв}}^{\text{min}} = 0,4993$.

За залежністю (8) здійснюється перевірка отриманого коефіцієнта $K_{\text{тв}}^{\text{min}}$:

$$\overline{K_{\text{тв}}} = \frac{1 - 0,4993}{-\ln(0,4993)} = 0,7209 \quad (13)$$

Збіжність коефіцієнтів технічної готовності є задовільною, тому для подальших розрахунків можна використовувати $K_{\text{тв}}^{\text{min}} = 0,4993$.

Параметр $\beta_{\text{с}}$, який характеризує зміну коефіцієнта технічного використання автомобіля в процесі його експлуатації визначається за залежністю:

$$\beta_{\text{с}} = \frac{-\ln(K_{\text{тв}}^{\text{min}})}{T_{\text{сп}}} = \frac{-\ln(0,4993)}{60} = 0,01157 \text{ міс}^{-1} \quad (14)$$

За отриманим значенням параметра $\beta_{\text{с}}$ можна розрахувати можливість досягнення пробігу $L_{\text{кр}}$ протягом визначеного періоду експлуатації:

$$\overline{L_{\text{кр}}} = \frac{L_{\text{см}}(1 - e^{-T_{\text{сп}}\beta_{\text{с}}})}{\beta_{\text{с}}} = \frac{10,4 * (1 - e^{-60 * 0,01157})}{0,01157} = 449,9 \text{ тис. км} \quad (15)$$

Середньомісячний пробіг автомобіля перед списанням визначається за залежністю:

$$L_{\text{см}}^{\text{сп}} = L_{\text{см}} K_{\text{тв}}^{\text{min}} = 10,4 * 0,4993 = 5,2 \text{ тис. км}$$

Після цього можна визначити коефіцієнт μ зміни середньомісячного пробігу автомобіля від нового до моменту списання:

$$\mu = \frac{L_{\text{сн}}}{L_{\text{сн}}} = \frac{10,4}{5,2} = 2,0$$

Таким чином встановлено, що середньомісячний пробіг автомобіля перед списанням зменшиться у 2,0 рази, порівняно з середньомісячним пробігом нового автомобіля. Тоді, зміна коефіцієнта технічного використання в процесі експлуатації автомобіля становитиме:

$$\alpha = \frac{\beta_c}{L_{\text{сн}}} = \frac{0,01157}{10,4} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ тис.км.}^{-1}$$

Таким чином, коефіцієнт технічного використання автомобіля на кожних 1000 км буде зменшуватися на 0,0011.

Значення коефіцієнта технічного використання автомобіля на певному пробігу визначається за залежністю:

$$k_{L_x}^{\text{ТБ}} = 1 - \alpha L_x$$

де L_x - пробіг, на якому визначається коефіцієнт, тис. км.

Для прикладу, за отриманими результатами розрахунків знайдено коефіцієнти використання автомобіля для пробігів 50, 150, 350 тис. км. За результатами розрахунків побудовано графік, наведений на рисунку 7.

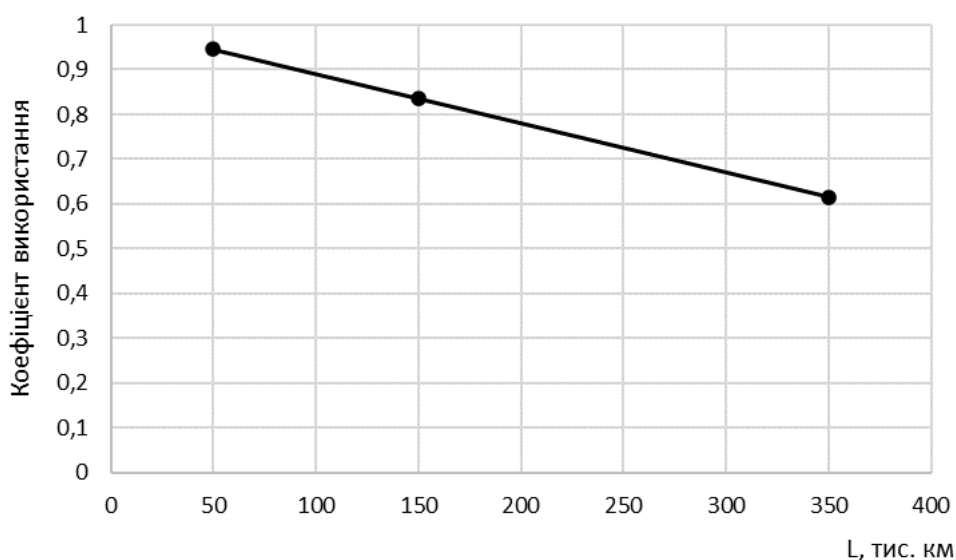


Рисунок 7 – Зміна коефіцієнта технічного використання автомобіля в процесі його експлуатації

Таким чином можна констатувати, що на пробігу 350 тис. км, коефіцієнт технічного використання автомобіля становитиме 0,615.

ВИСНОВКИ

У процесі експлуатації транспортного засобу його технічний стан поступово погіршується, що супроводжується зростанням витрат на технічне обслуговування та ремонт, зниженням коефіцієнтів технічної готовності та ефективності. Аналіз конструктивних змін у сучасних автомобілях показав, що ускладнення систем і агрегатів призводить до підвищення трудомісткості ремонтних робіт, особливо на пізніх етапах життєвого циклу транспортного засобу.

За результатами досліджень, спираючись на праці таких вчених як: Несвицький Я.І., Говорущенко М.Я., Кузнецов Є.С., Прудковський Б.Д., встановлено чітку залежність між віком автомобіля та рівнем експлуатаційних витрат, що дозволяє прогнозувати фінансові ризики, пов'язані з його подальшим використанням.

Узагальнено математичну модель зміни показників надійності та ефективності у часі, що дозволяє обґрунтовано приймати рішення щодо строків доцільної експлуатації транспортних засобів.

Запропонований підхід до прогнозування технічного стану та ефективності експлуатації може бути використаний підприємствами автотранспортної галузі для оптимізації витрат, планування оновлення парку та підвищення ефективності загальної діяльності. Перспективи подальших досліджень передбачають:

- удосконалення математичної моделі з урахуванням впливу зовнішніх факторів, таких як кліматичні умови та характер експлуатації;
- розробку диференційованих критеріїв оцінювання для різних типів автопарків;
- інтеграцію результатів у цифрові інструменти управління життєвим циклом транспорту;
- проведення поглибленого економічного аналізу ремонтних та модернізаційних рішень;
- застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для підвищення точності прогнозування технічного стану та ефективності експлуатації автотранспорту.

Отримані результати можуть слугувати основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо оптимізації експлуатації транспортних засобів та підвищення економічної ефективності автопарків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Філь, Н. (2022). Моделі вибору обладнання для автосервісу. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (47), 48-54. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-47-19>.
2. Danilecki, K., Smurawski, P., & Urbanowicz, K. (2023). Optimization of Car Use Time for Different Maintenance and Repair Scenarios Based on Life Cycle Assessment. *Applied Sciences*, 13(17), 9843. <https://doi.org/10.3390/app13179843>.
3. Burnham, Andrew, Gohlke, David, Rush, Luke, Stephens, Thomas, Zhou, Yan, Delucchi, Mark A., Birky, Alicia, Hunter, Chad, Lin, Zhenhong, Ou, Shiqi, Xie, Fei, Proctor, Camron, Wiryadinata, Steven, Liu, Nawei, & Boloor, Madhur (2021). Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. <https://doi.org/10.2172/1780970>.
4. Ulbrich D, Selech J, Kowalczyk J, Józwiak J, Durczak K, Gil L, Pieniak D, Paczkowska M, Przystupa K. Reliability Analysis for Unrepairable Automotive Components. *Materials*. 2021; 14(22):7014. <https://doi.org/10.3390/ma14227014>.
5. Wróblewski P, Lewicki W. A Method of Analyzing the Residual Values of Low-Emission Vehicles Based on a Selected Expert Method Taking into Account Stochastic Operational Parameters. *Energies*. 2021; 14(21):6859. <https://doi.org/10.3390/en14216859>.
6. Foad H. Gandoman, Abdollah Ahmadi, Peter Van den Bossche, Joeri Van Mierlo, Noshin Omar, Ali Esmaeel Nezhad, Hani Mavalizadeh, Clément Mayet, Status and future perspectives of reliability assessment for electric vehicles, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 183, 2019, Pages 1-16, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.013>.
7. Tortbayeva, D.R., Pernebekov, S.S., Ussipbayev, U.A., Shoibekov, B.Z., & Kazenova, A.O. (2023). Technical Maintenance of Vehicles: Improvement of Reliability of the Major Components and Units. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 25(3), B165-176. doi: 10.26552/com.C.2023.045.
8. Y. Lu, H. Ma, E. Smart and H. Yu, "Real-Time Performance-Focused Localization Techniques for Autonomous Vehicle: A Review," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 7, pp. 6082-6100, July 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3077800..
9. B. S. Babu, J. Kamalakannan, N. Meenatchi, S. K. S. M, K. S and S. Boopathi, "Economic impacts and reliability evaluation of battery by adopting Electric Vehicle," 2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPECTS56089.2022.10046786..
10. Kozłowski, E., Borucka, A., Oleszczuk, P., Jałowicz, T. (2023). Evaluation of the maintenance system readiness using the semi-Markov model taking into account hidden factors. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 25(4). <https://doi.org/10.17531/ein/172857>.

11. Oszczypała M, Ziolkowski J, Małachowski J. Modelling the Operation Process of Light Utility Vehicles in Transport Systems Using Monte Carlo Simulation and Semi-Markov Approach. *Energies*. 2023; 16(5):2210. <https://doi.org/10.3390/en16052210>.
12. Zhou X, Yang J, Wang J, Li J. Model and simulation of the fuzzy reliability assessment of the electric vehicle motor. *Advances in Mechanical Engineering*. 2022;14(8). doi:10.1177/16878132221120406
13. C. Jiang et al., "R2-RRT*: Reliability-Based Robust Mission Planning of Off-Road Autonomous Ground Vehicle Under Uncertain Terrain Environment," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 1030-1046, April 2022, doi: 10.1109/TASE.2021.3050762.
14. Tanmoy Palit, A.B.M. Mainul Bari, Chitra Lekha Karmaker, An integrated Principal Component Analysis and Interpretive Structural Modeling approach for electric vehicle adoption decisions in sustainable transportation systems, *Decision Analytics Journal*, Volume 4, 2022, 100119, ISSN 2772-6622, <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100119>.
15. Форнальчик Є.Ю. Технічна експлуатація та надійність автомобілів / Є.Ю. Форнальчик, М.С. Олісевич, О.Л. Мاستикаш, Р.А. Пельо. – Львів «Афіша», 2004. – 492 с
16. Форнальчик Є. Ю. Експлуатаційна надійність автобусів міського громадського транспорту / Є. Ю. Форнальчик, М. А. Виджак // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. - 2016. - Вип. 1. - С. 91-96. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2016_1_15.
17. Форнальчик Є. Ю. Визначення інтервалів руху та наповненості салонів транспортних засобів на міських маршрутах / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Демчук // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. - 2016. - № 1. - С. 163-166. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt_2016_1_32.
18. Хаврук, В. (2021). Вплив техніко-експлуатаційних властивостей вантажних автомобілів на показники ефективності експлуатації. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 1(16), 168-175. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.519>
19. Аулін, В. В. Методи підвищення експлуатаційної надійності елементів ходової частини автомобіля / В. В. Аулін, В. В. Сандул, О. М. Маковкін // Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту : міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 14-15 листоп. 2018 р., м. Кропивницький : зб. наук. матеріалів / М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2018. - С. 207-211.
20. Д. В. . Голуб, В. В. . Біліченко, В. В. . Аулін, А. С. Замуренко, і Р. П. . Кічура, «Методологічний підхід до розв'язання проблеми надійності функціонування автомобільних транспортних систем», *ВМТ*, вип. 19, вип. 1, с. 29–38, Лип 2024.
21. Канарчук В.Е. та ін. Надійність машин. – Київ: Либідь, 2003
22. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів : монографія [Електронний ресурс] / В. Д. Мигаль. – Харків : Майдан, 2018. – 262 с. – ISBN 978-966-372-704-2
23. Мигаль В. Д. Оцінка інтелектуальних якостей автомобілів / В. Д. Мигаль, А. Т. Лебедев, М. Л. Шуляк, Є. І. Калінін // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. - 2019. - № 15. - С. 213-228. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2019_15_22.
24. Dziedziak, P., Szczepański, T., Niewczas, A. & Słezak, M. (2021). Car reliability analysis based on periodic technical tests. *Open Engineering*, 11(1), 630-638. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0061>
25. Методи нарахування амортизації основних засобів. Електронний ресурс. Дата звернення 23.04.2025. Режим доступу: <https://services.uteka.ua/ua/publication/data-16-dannie-dlya-raschetov-58-metody-nachisleniya-amortizacii-osnovnyx-sredstv>
26. Методи нарахування амортизації основних засобів. Електронний ресурс. Дата звернення 23.04.2025. Режим доступу: <https://services.uteka.ua/ua/publication/data-16-dannie-dlya-raschetov-58-metody-nachisleniya-amortizacii-osnovnyx-sredstv>
27. Амортизація основних засобів: методи нарахування. Електронний ресурс. Дата звернення 23.04.2025. Режим доступу: <https://buhplatforma.com.ua/article/7267-amortizatsiya-osnovnih-zasobv-na-pdprimstv-u-2021-rots>
28. Ошурков С. Методи нарахування амортизації. Електронний ресурс. Дата звернення 23.04.2025. Режим доступу: <https://www.buhoblik.org.ua/uchet/uchet-osnovnyx-sredstv/1060-metodi-naraxuvannya-amortizacz.html>
29. Амортизація основних засобів на підприємстві у 2024 році. Електронний ресурс. Дата звернення 23.04.2025. Режим доступу: <https://faktoria.kiev.ua/uk/amortizaciya-osnovnih-zasobiv-na-pidpriyemstvi/>

REFERENCES

1. Fil, N. (2022). Models of selection of equipment for car service. Computer-integrated technologies: education, science, production, (47), 48-54. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-47-19>.
2. Danilecki, K., Smurawski, P., & Urbanowicz, K. (2023). Optimization of Car Use Time for Different Maintenance and Repair Scenarios Based on Life Cycle Assessment. *Applied Sciences*, 13(17), 9843. <https://doi.org/10.3390/app13179843>.
3. Burnham, Andrew, Gohlke, David, Rush, Luke, Stephens, Thomas, Zhou, Yan, Delucchi, Mark A., Birky, Alicia, Hunter, Chad, Lin, Zhenhong, Ou, Shiqi, Xie, Fei, Proctor, Camron, Wiryadinata, Steven, Liu, Nawei, & Boloor, Madhur (2021). Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. <https://doi.org/10.2172/1780970>.
4. Ulbrich D, Selech J, Kowalczyk J, Józwiak J, Durczak K, Gil L, Pieniak D, Paczkowska M, Przystupa K. Reliability Analysis for Unrepairable Automotive Components. *Materials*. 2021; 14(22):7014. <https://doi.org/10.3390/ma14227014>.
5. Wróblewski P, Lewicki W. A Method of Analyzing the Residual Values of Low-Emission Vehicles Based on a Selected Expert Method Taking into Account Stochastic Operational Parameters. *Energies*. 2021; 14(21):6859. <https://doi.org/10.3390/en14216859>.
6. Foad H. Gandoman, Abdollah Ahmadi, Peter Van den Bossche, Joeri Van Mierlo, Noshin Omar, Ali Esmaeel Nezhad, Hani Mavalizadeh, Clément Mayet, Status and future perspectives of reliability assessment for electric vehicles, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 183, 2019, Pages 1-16, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.013>.
7. Tortbayeva, D.R., Pernebekov, S.S., Ussipbayev, U.A., Shoibekov, B.Z., & Kazenova, A.O. (2023). Technical Maintenance of Vehicles: Improvement of Reliability of the Major Components and Units. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 25(3), B165-176. doi: 10.26552/com.C.2023.045.
8. Y. Lu, H. Ma, E. Smart and H. Yu, "Real-Time Performance-Focused Localization Techniques for Autonomous Vehicles: A Review," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 7, pp. 6082-6100, July 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3077800..
9. B. S. Babu, J. Kamalakannan, N. Meenatchi, S. K. S. M, K. S and S. Boopathi, "Economic impacts and reliability evaluation of battery by adopting Electric Vehicle," 2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPECTS56089.2022.10046786..
10. Kozłowski, E., Borucka, A., Oleszczuk, P., Jałowicz, T. (2023). Evaluation of the maintenance system readiness using the semi-Markov model taking into account hidden factors. *Eksploracja i Nyalydałowość – Maintenance and Reliability*, 25(4). <https://doi.org/10.17531/ein/172857>.
11. Oszczypała M, Ziółkowski J, Małachowski J. Modeling the Operation Process of Light Utility Vehicles in Transport Systems Using Monte Carlo Simulation and Semi-Markov Approach. *Energies*. 2023; 16(5):2210. <https://doi.org/10.3390/en16052210>.
12. Zhou X, Yang J, Wang J, Li J. Model and simulation of the fuzzy reliability assessment of the electric vehicle motor. *Advances in Mechanical Engineering*. 2022;14(8). doi:10.1177/16878132221120406
13. C. Jiang et al., "R2-RRT*: Reliability-Based Robust Mission Planning of Off-Road Autonomous Ground Vehicle Under Uncertain Terrain Environment," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 1030-1046, April 2022, doi: 10.1109/TASE.2021.3050762.
14. Tanmoy Palit, A.B.M. Mainul Bari, Chitra Lekha Karmaker, An integrated Principal Component Analysis and Interpretive Structural Modeling approach for electric vehicle adoption decisions in sustainable transportation systems, *Decision Analytics Journal*, Volume 4, 2022, 100119, ISSN 2772-6622, <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100119>.
15. Fornalchyk E.Yu. Technical operation and reliability of vehicles / E.Yu. Fornalchyk, M.S. Oliskevich, O.L. Mastyakash, R.A. Pelyo. – Lviv “Afisha”, 2004. – 492 p
16. Fornalchyk E.Yu. Operational reliability of city public transport buses / E.Yu. Fornalchyk, M.A. Vidzhak // *Bulletin of the Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrohradsky*. - 2016. - Issue. 1. - P. 91-96. - Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2016_1_15.
17. Fornalchyk E. Yu. Determination of movement intervals and occupancy of vehicle cabins on city routes / E. Yu. Fornalchyk, I. A. Demchuk // *Modern technologies in mechanical engineering and transport*. - 2016. - No. 1. - P. 163-166. - Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt_2016_1_32.

18. Havruk , V. (2021). The influence of technical and operational properties of trucks on indicators of operational efficiency. *Modern technologies in mechanical engineering and transport*, 1(16), 168-175. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.519>
19. Aulin, V. V. Methods for increasing the operational reliability of vehicle chassis elements / V. V. Aulin, V. V. Sandul, O. M. Makovkin // *Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: international scientific-practical online conference*, November 14-15, 2018, Kropyvnytskyi: collection of scientific materials / Ministry of Education and Science of Ukraine, Central Ukrainian National Technical University - Kropyvnytskyi: TSNTU, 2018. - pp. 207-211.
20. D. V. . Holub, V. V. . Bilichenko, V. V. . Aulin, A. S. Zamurenko, and R. P. . Kichura, "Methodological approach to solving the problem of the reliability of the functioning of road transport systems", *VMT*, vol. 19, vol. 1, p. 29–38, Jul 2024.
21. Kanarchuk V.E. et al. *Reliability of machines*. – Kyiv: Lybid, 2003
22. Mygal V.D. *Intelligent systems in the technical operation of cars: monograph* [Electronic resource] / V.D. Mygal. – Kharkiv: Maidan, 2018. – 262 p. – ISBN 978-966-372-704-2
23. Mygal V.D. *Assessment of intellectual qualities of cars* / V.D. Mygal, A.T. Lebedev, M.L. Shulyak, E.I. Kalinin // *Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes*. - 2019. - No. 15. - P. 213-228. - Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2019_15_22.
24. Dziedziak, P., Szczepański, T., Niewczas, A. & Ślęzak, M. (2021). Car reliability analysis based on periodic technical tests. *Open Engineering*, 11(1), 630-638. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0061>
25. *Methods of calculating depreciation of fixed assets*. Electronic resource. Date of access 23.04.2025. Access mode: <https://services.uteka.ua/ua/publication/data-16-dannie-dlya-raschetov-58-metody-nachisleniya-amortizacii-osnovnyx-sredstv>
26. *Methods of calculating depreciation of fixed assets*. Electronic resource. Date of access 23.04.2025. Access mode: <https://services.uteka.ua/ua/publication/data-16-dannie-dlya-raschetov-58-metody-nachisleniya-amortizacii-osnovnyx-sredstv>
27. *Depreciation of fixed assets: methods of calculation*. Electronic resource. Access date 04/23/2025. Access mode: <https://buhplatforma.com.ua/article/7267-amortizatsiya-osnovnih-zasobiv-na-pdprimstv-u-2021-rots>
28. Oshurkov S. *Methods of calculating depreciation*. Electronic resource. Access date 04/23/2025. Access mode: <https://www.buhoblik.org.ua/uchet/uchet-osnovnyx-sredstv/1060-metodi-naraxuvannya-amortizacz.html>
29. *Depreciation of fixed assets at the enterprise in 2024*. Electronic resource. Date of application 04/23/2025. Access mode: <https://faktoria.kiev.ua/uk/amortizaciya-osnovnih-zasobiv-na-pidpriyemstvi/>

V. Dembitskyi, V. Samostian. Improving the Efficiency of Road Transport Management Based on the Assessment of its Reliability and Quality

The article considers theoretical and applied aspects of assessing the feasibility of further operation of vehicles that have lost part of their technical resource due to prolonged operation. Particular attention is paid to the problem of making informed decisions on the continuation of use or write-off of transport units, taking into account both technical condition and economic feasibility. In the context of the increase in the cost of new vehicles, the increase in prices for maintenance and repair, as well as the need to optimize fleet management costs, the relevance of this study is due to the need for a systematic approach to assessing the efficiency of operation of transport that has already partially exhausted its resource.

Within the framework of the study, a structure of the methodology for assessing the residual resource of vehicles was proposed, taking into account technical and economic indicators. Key parameters that influence decision-making were identified, in particular indicators of reliability, intensity of operation and the coefficient of technical readiness. A mathematical model was generalized, which allows for a formal assessment of the feasibility of further operation of a particular vehicle, taking into account real operational data, as well as for predicting the efficiency of further use of the vehicle.

Prospects for further research are outlined, including taking into account external operating factors, adapting the model to different types of vehicles, using artificial intelligence and machine learning methods to increase the accuracy of forecasts of technical condition and operational efficiency. The study has practical value for transport logistics entities, fleet managers, as well as scientists dealing with issues of the efficiency of technical operation of transport.

Keywords: operational feasibility, vehicles, technical resource, residual resource, technical and economic assessment, efficiency of use, wear, maintainability, fleet management, mathematical model, decision-making, transport logistics.

ДЕМБІЦЬКИЙ Валерій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, ЛНТУ, e-mail: dvm2@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1006-9218>

САМОСТЯН Віктор Русланович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: cvmbf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-6823-8558>

Valerii DEMBITSKYI, PhD. in Engineering associate professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: dvm2@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1006-9218>

Viktor SAMOSTIAN, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: svrmbf@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6823-8558>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1723

Дитятєв О.В.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна***ДО АНАЛІЗУ НОВОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ АМОРТИЗАТОРІВ У ПІДВІСЦІ АВТОМОБІЛЯ**

До найважливіших експлуатаційних властивостей автомобіля належить безпека, яка реалізується через стійкість, керованість, надійність контакту шини з дорогою. У процесі експлуатації з напрацюванням параметри амортизатора погіршуються, знижується безпека і комфорт. Це призводить до необхідності періодично контролювати стан амортизаторів засобами діагностики. Широко застосовується безрозбірна діагностика, оскільки монтажні-демонтажні роботи мають велику трудомісткість, вимагають застосування спеціального обладнання та кваліфікованих спеціалістів. Значну перевагу отримало стендове тестування із застосуванням збудження підвіски періодичним сигналом. Однак при тестуванні підвіски в зборі, у висновку про тестування амортизатора міститься інформація про інші компоненти підвіски, наприклад про підресорену масу, про жорсткість (внутрішній тиск) шини. При цьому тестується не амортизатор, а підвіска загалом. Окремі методи діагностики тією чи іншою мірою зменшують негативний вплив сторонніх факторів під час діагностування амортизаторів. Пропонуються нові методи з перевагами у продуктивності, точності діагнозу, що ґрунтуються на теорії динаміки механічних систем, спектральній обробці діагностичної інформації. У цій роботі методом імітаційного моделювання аналізується новий метод – «метод пікового вибору», що також називається методом половинної потужності, метод Кальво, - в його порівнянні з існуючим, реалізованим в стенді конструкції фірми MAXA EUROSISTEM. Аналіз проведений за критеріями чутливості, залежності результатів тестування амортизатора від підресореної маси, внутрішнього тиску шини.

Ключові слова: діагностика амортизаторів, методи, моделювання, аналіз, точність, сторонні фактори.

ВСТУП

Підвіска автомобіля здійснює дві найважливіші функції – комфорт та безпеку руху. Комфорт забезпечується правильною характеристикою "швидкість - сила" протягом ходу штока при стисненні та віддачі, а безпека - стабільністю контакту шини з дорогою. Контакт шини з дорогою визначається частотними характеристиками підвіски, у формуванні яких важлива роль належить амортизатору, його технічному стану. У процесі експлуатації технічний стан погіршується, тому слід його періодично перевіряти.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Існує кілька методів тестового діагностування амортизаторів, що відрізняються видом силової дії на підвіску. Це може бути одиничний вплив (за схемою Дірака), вплив поодиноким перепадом типу "сходінка" (за схемою Хевісайда), або періодичним сигналом [1].

Реакцією на одиничний вплив є імпульсна перехідна функція. На сигнал типу "сходінка" система реагує перехідною функцією. На періодичний сигнал підвіска також реагує періодичним сигналом. Параметри підвіски та працездатність амортизаторів оцінюють обробкою реакції підвіски на силову дію. Реєструються амплітуди, частоти, фази коливань, головним чином підресорених мас.

Сигнал "одиничний вплив" використовується в переносному тестері амортизаторів SAT USB фірми М - TRONIC [2]. Також відомий стенд, заснований на застосуванні сигналу типу сходінка [3]. Однак широкого поширення у практиці діагностування методи одиничних сигналів не знайшли внаслідок залежності результатів діагнозу амортизатора від сторонніх явищ, зокрема від сухого тертя в підвісці. Тому нині ці методи мають лише теоретичне значення. Інша річ методи, засновані на використанні періодичного сигналу, головним чином, гармонійного. Винятково всі стенди діагностування амортизаторів, які пропонуються на сучасному ринку автосервісного обладнання, працюють на періодичному сигналі (вимушених коливаннях) типу синусоїди. Тут є кілька методів та відповідних стендів. Спільним для них є вхідний силовий сигнал у вигляді синусоїди, відмінності полягають у частотних діапазонах випробувань і вимірюваних вихідних сигналах. Нагадаємо, що до діагностичних параметрів висуваються вимоги точності, достатньої чутливості, плавності зміни (без розривів), однозначності, доступної реалізації процесу вимірювання. Як діагностичні параметри тут використовуються: «коефіцієнт EuSAMA [4]», фазовий кут [5], процентний індекс згасання [6], розмах коливань безпружинної маси при резонансі, коефіцієнт демпфірування Θ (він же D).

Великий набір діагностичних параметрів та відповідних їм методів свідчить про відсутність методу, що задовольняє всім вимогам, особливо вимогу точності [8-10]. Недолік точності обумовлений впливом сторонніх факторів, які не мають відношення до технічного стану

амортизатора. У значно спрощеному вигляді амплітуда вимушених коливань підресореної маси A , яка є вихідним параметром для більшості методів, дорівнює:

$$A = \frac{F_0}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega)^2}}, \quad (1)$$

де F_0, ω - амплітуда і частота сили, що змушує;

m – маса;

ξ - коефіцієнт загасання підвіски;

ω_0 – частота вільних незагасних коливань.

У свою чергу,
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}; \quad \xi = \frac{2r}{m}; \quad (2)$$

де c – жорсткість підвіски;

r – коефіцієнт опору.

Беручи до уваги формули 1,2, а також склад жорсткості підвіски (жорсткість шини та пружного пристрою), можна зробити висновок, що зміна маси підресорених і непідресорених частин і зміна жорсткості шини (внутрішнього тиску) є основними джерелами похибок при діагностуванні амортизатора. На пошук шляхів зниження похибок спрямовані зусилля дослідників. Вказується, що найбільш перспективними у цьому напрямі можуть вважатися методи, що базуються на параметрах «фазовий кут» та «коефіцієнт демпфірування» [10].

Слід зазначити, що коефіцієнт демпфірування (у різних джерелах позначається Θ , ϑ , D), як параметр, що характеризує властивості підвіски, відомий давно [11]. У ДСТУ він визначений як «Відносне демпфірування – відношення коефіцієнта демпфірування системи до критичного коефіцієнта демпфірування» [12]. В Україні на ринку автосервісного обладнання є пропозиції кількох фірм, наприклад: Hofmann, стенд Contactest 3800 PC; EURO МАНА стенд MSD 3000 – для діагностування підвіски автомобілів «за методом ТЕТА, D».

Параметр «відносне демпфірування Θ » для підвіски визначається за такою формулою:

$$\Theta = \frac{d}{c_c} = \frac{d}{2\sqrt{c_{\pi} \cdot m_1}}, \quad (3)$$

де d – коефіцієнт демпфірування, Н*с/м;

c_c – критичний коефіцієнт демпфірування Н*с/м;

c_{π} – жорсткість підвіски, Н/м;

m_1 – підресорена маса, кг.

Знаменник формули є критичний коефіцієнт демпфірування, тобто, його граничне значення, у якому система перестає бути коливальною, можна визначити статично. Чисельник формули d є поточним (вимірним) коефіцієнтом демпфірування підвіски автомобіля. Він дорівнює:

$$d = \frac{b}{2 \cdot m_1}, \quad (4)$$

де b – коефіцієнт в'язкого опору лінійної системи з одним ступенем вільності, Н*с/м.

Завдання визначення технічного стану амортизатора без зняття з автомобіля, зрештою, зводиться до коректного визначення коефіцієнта демпфірування d , значення якого визначається динамікою. Є певні проблеми, пов'язані з тим, що тестування проводиться у складі системи підвіски. Тому, строго кажучи, при тестуванні на стенді визначається демпфування підвіски в зборі (в тому числі амортизатора) і в інструкціях з експлуатації стендів це вказується.

Існує кілька методів визначення коефіцієнта демпфірування d (формула 4) у цих умовах. У цій роботі розглядаються два з них: що давно використовується, реалізований фірмою МАХА EUROSYSTEM в стенді MSD 3000 [13] та перспективний «метод половинної потужності» [14,15], відомий з модального аналізу та антеної техніки.

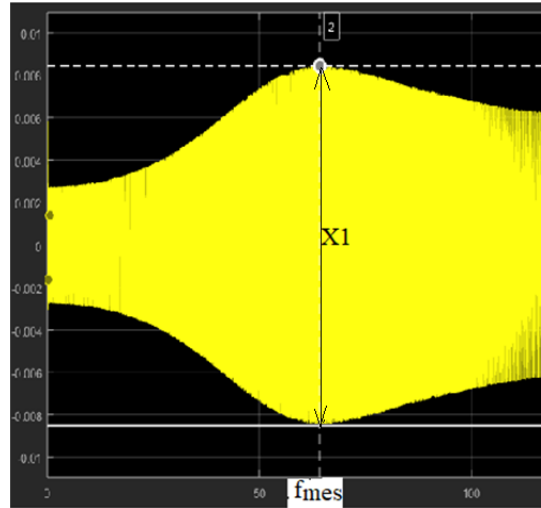
В основу методу МАХА покладено принцип, що відповідає формулі (3), причому компонент формули c_{π} означає жорсткість пружини стенду в Н/м. Коефіцієнт демпфірування d визначається таким чином:

$$d = \frac{c_g \cdot r}{2\pi \cdot f_{max} \cdot X_1} - d_{ст}, \quad \text{Н*с/м}, \quad (5)$$

де c_g - сума жорсткостей пружин стенду, Н/м;

r – амплітуда - хід опорних майданчиків від ВМТ до НМТ за малої частоти коливань, мм;
 f_{mes} – частота, за якої амплітуда опорних майданчиків, що коливаються, є максимальною, 1/с;
 $X1$ - подвійна амплітуда коливань майданчиків за резонансною частотою, мм;
 dct - коефіцієнт демпфування стенду (власне демпфування), Н * с/м.

Неважко помітити, що величини C_p , C_g , r є постійними величинами стенду, а величини $m1$, f_{mes} , $X1$ підлягають виміру у процесі тестування. Схема вимірювання та вимірювані величини представлені на рисунку 1.



$X1$ - подвійна амплітуда коливань майданчика при резонансі, мм; f_{mes} - частота резонансу, Гц.

Рисунок 1. Схема вимірювань методом MAXA EUROSYSTEM

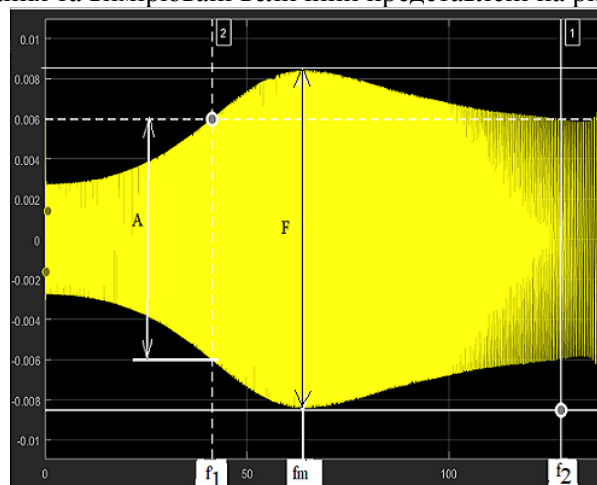
Метод половинної потужності, званий також методом Кальво (Calvo), на думку авторів, має значні переваги, порівняно з існуючими методами. Потрібний вимір абсолютної величини лише одного параметра – частоти. Вимірювання абсолютної величини переміщення майданчика не потрібно - достатньо забезпечити лінійність переміщення залежно від динамічної сили. Це значно спрощує і здешевлює експлуатацію стенду. Крім того, на думку авторів, результат тестування не залежить від коливань маси автомобіля та тиску у шинах. Результат визначається за такою формулою:

$$\Theta = \frac{f_1 - f_2}{f_m}, \quad (6)$$

де f_1, f_2 – частоти, що відповідають точкам перетину з резонансною кривою на рівні $0,707$ або $(1/\sqrt{2})$ від максимального відхилення майданчика, Гц;

f_m - частота резонансу, Гц.

Схема вимірювання та вимірювані величини представлені на рисунку 2.



F – розмах коливань майданчика при резонансі, мм; A – подвійна амплітуда лише на рівні $F/\sqrt{2}$, мм; f_1, f_2, f_m – частоти відповідно до формули (6).

Рисунок 2. Схема вимірів методом Кальво.

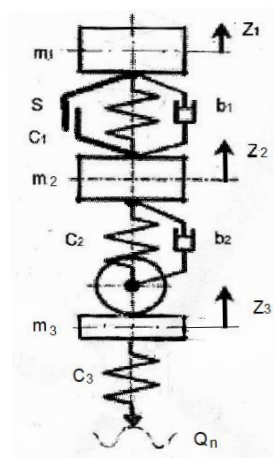
На цей час є достатньо досліджень методу Кальво у порівнянні з іншими перспективними методами. У першоджерелі описаний експериментальний стенд та представлені результати, отримані при тестуванні на цьому стенді різних автомобілів. Тим не менш, великий теоретичний і практичний інтерес представляє аналіз переваг та недоліків методу Кальво в порівнянні з існуючими методами, реалізованими в конкретних конструкціях стендів та наявними на ринку автосервісного обладнання.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як вказувалося, основною проблемою визначення технічного стану амортизаторів у підвісці автомобіля без його зняття є недостатня точність результату тестування. Причина цього у впливі сполучених компонентів, їх конструктивні і частотні параметри. Дослідження останніх років спрямовані на пошук нових методів діагностування, у яких відсутні або мінімізуються вплив сторонніх факторів на результати тестування. У цій роботі поставлена мета: порівняти основні властивості нового методу діагностики, методу Кальво, з традиційним методом, який також використовує як діагностичний параметр відносний коефіцієнт демпфірування. Порівняння провести в однакових умовах, позначених параметрами стенду MAXA EUROSYSYSTEM MSD 3000. У цьому випадку для обох варіантів порівняння всі параметри однакові, за винятком порівнюваних коефіцієнтів демпфірування. З властивостей методів аналізуються залежності діагностичних параметрів від коефіцієнта демпфування, а також підресореної маси та внутрішнього тиску в шині, що негативно впливають на результат діагнозу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як основний метод дослідження прийнято імітаційне моделювання у середовищі SIMULINK. Використовувалася "трюхмасова" модель "чверть" підвіски автомобіля на майданчику, причому майданчику надавалась відповідна маса і жорсткість [16]. Модель містить три маси, що послідовно з'єднані у вертикальному напрямку - m_1 , m_2 , m_3 ; три пружні пристрої - c_1 , c_2 , c_3 і два пристрої демпфірування - b_1 , b_2 . Використання пружин з лінійною характеристикою переміщення дозволяє використовувати лінійні динамічні моделі. Наступне припущення стосується впливу на результат випробування іншого колеса осі. Внаслідок незначних переміщень колеса та кузова цим впливом нехтуємо. Розрахункова схема моделі представлена на рисунку 3.



m_1 , m_2 , m_3 – підресорена, непідресорена маси, маса майданчика стенду відповідно; C_1 , C_2 , C_3 – жорсткість пружини підвіски, шини, пружини стенду; b_1 , b_2 – коефіцієнти демпфірування амортизатора та шини; s – коефіцієнт сухого тертя у підвісці; Z_1 , Z_2 , Z_3 – переміщення підресореної, непідресореної маси, маси майданчика стенду відповідно; Q_n – кінематичне збудження майданчика стенду.

Рисунок 3. Розрахункова схема.

Математична модель системи містить систему трьох диференціальних рівнянь, складених з урахуванням принципу Даламбера – Лагранжа. Вирішувалися рівняння чисельним методом MATLAB SIMULINK. Комп'ютерна модель системи представлена на рисунку 4.

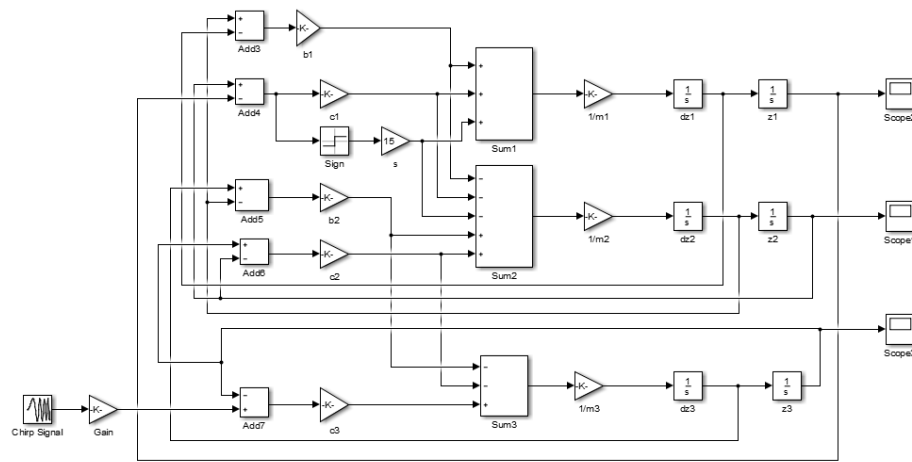


Рисунок 4. Комп'ютерна модель

Для моделювання була прийнята підвіска переднього колеса автомобіля SKODA FABIA 1,6, параметри моделі надано у таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри моделі для розрахунку

Показник	Значення	Одиниця виміру
Амплітуда нерівності	$A = 0,0065$	м
Маса кузова	$m1 = 376$	кг
Жорсткість пружини	$c1 = 25000$	Н/м
Коефіцієнт демпфірування амортизатора	$b1 = 2759,4 \dots 306,6$	Н*с/м
Сухе тертя в підвісці	$s = 15$	Н*с/м
Непідресорена маса	$m2 = 35$	кг
Жорсткість шини	$c2 = 273$	кН/м
Коефіцієнт Демпфірування шини	$b2 = 200$	Н*с/м
Маса опорного майданчика	$m3 = 15$	кг
Жорсткість пружного пристрою майданчика	$c3 = 257$	кН/м

Початок інтегрування – 0 с, кінець інтегрування – 150 с.

Для прийнятих параметрів критичне демпфування системи дорівнює $C_c = 61319 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$.
Прийняті під час моделювання дані демпфірування наведено у таблиці 2.

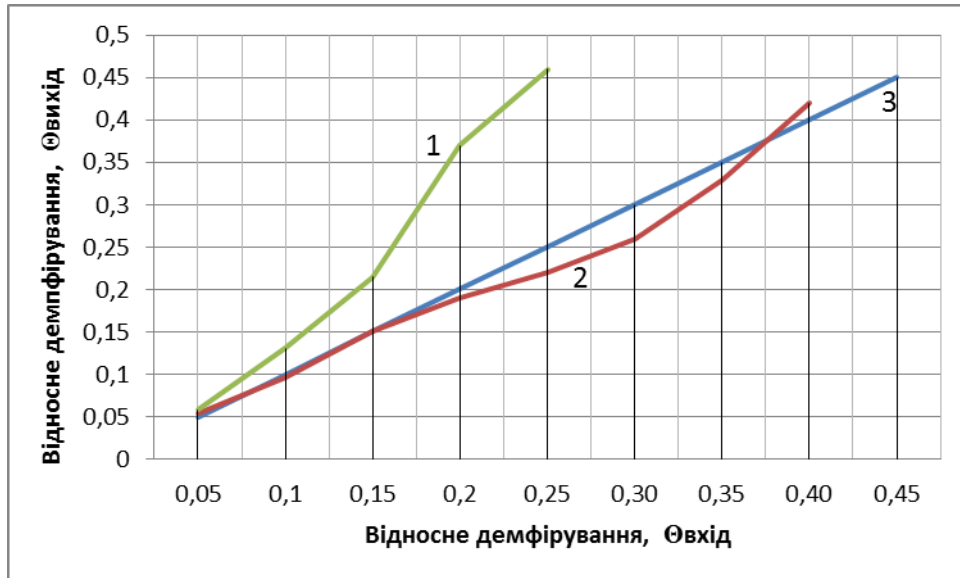
Таблиця 2. Параметри демпфірування моделі

Коефіцієнт Демпфірування $b1$	306,6	613,2	919,8	1226,4	1532,9	1839,6	2146,2	2452,8	2759,4
Відносне демпфірування Θ	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45

Амплітуда нерівності прийнята у стенді MSD 3000 MAXA EUROSISTEM, що діє.

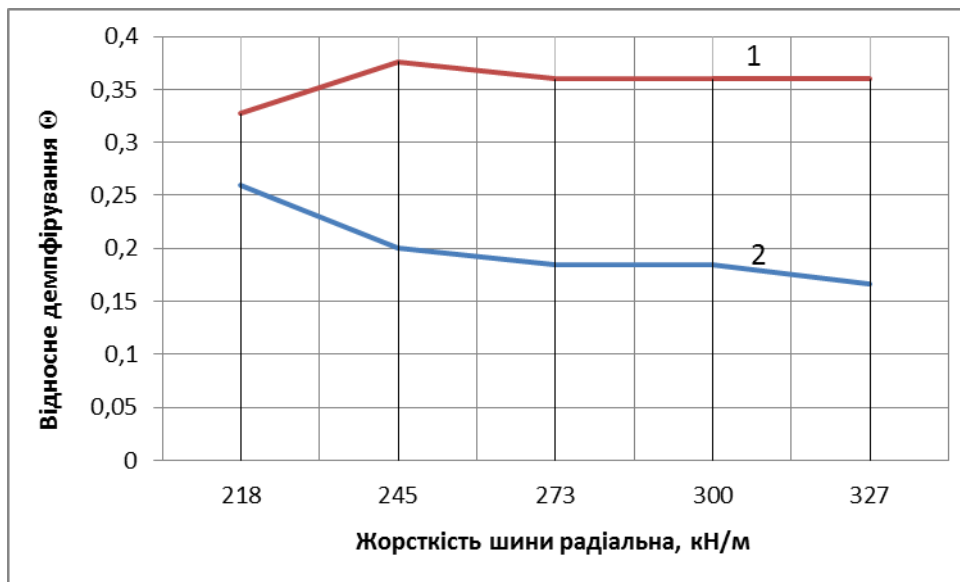
Як сигнал збудження підвіски використовується гармонійний сигнал (блок Chirp Signal із частотою, що зменшується від початку коливання приводу стенду до його зупинки). Початкова частота сканування дорівнює 15 Гц, мінімальна – 0 Гц. Модулятор приводу стенду поступово знижує частоту коливань опорної площадки з максимальною до 0 Гц. Отже, тут прийнято суто кінематична модель зниження частоти обурення, тобто модель без урахування природного розсіювання енергії. Як і в стенді MSD 3000, аналіз систем проводився на околицях другого резонансу.

Результати моделювання представлені на малюнках 5,6.



1 – метод Кольво; 2 – метод MAXA EUROSYSYSTEM, стенд MSD 3000; 3 – переважна характеристика

Рисунок 5. Залежність відносного демпфірування на виході від відносного демпфірування на вході в модель (коефіцієнт посилення методу)



1 – метод Кольво; 2 – метод MAXA EUROSYSYSTEM, стенд MSD 3000

Рисунок 6. Залежність величини відносного демпфірування від радіальної жорсткості шини за відносним демпфіруванням $\Theta=0,2$.

Крім того, оцінювався вплив зміни підресореної маси на величину відносного демпфірування при $\Theta_{\text{вхід}}=0,2$. Розрахунки велися для збільшення маси до 40% з кроком 10%. В результаті для обох методів була отримана незалежність відносного демпфірування від зміни підресореної маси.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рисунку 5 представлена залежність відносного демпфірування на виході від відносного демпфірування на вході модель для трьох методів діагностування. По суті, ця характеристика відповідає коефіцієнту посилення методу. Залежність 3 є теоретично кращою з тієї причини, що результат діагностування відповідає об'єктивній характеристиці коливань (тета), відомої в теорії і не потребує корекції. У цьому контексті метод Кальво, залежність 1, суттєво завищує показання у всьому діапазоні значень відносного демпфування. Так, при Θ вхід = 0,2 метод завищує показання тесту в 1,85 рази. Таким чином, для промислового застосування методу потрібна корекція показань. Разом з тим, відмінності Θ вихід від значень залежності 3 може розглядатися як показник чутливості методу. В даному випадку, при значенні Θ вхід = 0,25 метод Кальво показує чутливість у 2,1 рази більшу, ніж MAXA EUROSYSYSTEM. У випадках, коли потрібне велике відношення сигнал/шум у діагностичному сигналі, ця властивість може бути корисною.

У діапазоні значень відносного демпфування $\Theta=0,25\dots0,45$ значення методу Кальво не визначаються, оскільки значення амплітуд коливань, що огинає, не досягають рівня $1/\sqrt{2}$.

Залежність 2 демонструє характеристику методу MAXA EUROSYSYSTEM, стенд MSD 3000. Залежність трохи відрізняється від кращої залежності 3; максимальне відхилення не перевищує 16%.

На рисунку 6 наведено залежності величини відносного демпфування від радіальної жорсткості шини при відносному демпфіруванні для методів, що аналізуються при $\Theta=0,2$. Номінальна жорсткості становить 373 кН/м, що відповідає внутрішньому тиску в шині 210 кПа. Розраховувалися значення відносного демпфірування при відхиленнях жорсткості від номінальної 373 на $\pm 20\%$ через кожні 10%.

У діапазоні значень жорсткості 218-245 кН/м методи демонструють різноспрямовані тенденції: значення відносного демпфірування Θ по Кальво зростають, а по MAXA EUROSYSYSTEM знижуються. Максимальні відхилення у всьому діапазоні відхилень жорсткості шини по Кальво становлять 14,6%, по MAXA EUROSYSYSTEM - 36,1%.

ВИСНОВКИ

Метод Кальво застосовується при значеннях відносного демпфування від 0 до 0,25, тобто для випадків з вкрай незадовільним і задовільним станом амортизатора. У цьому діапазоні значень метод демонструє більш високі значення відносного демпфірування Θ вихід, що може призвести до помилкового діагнозу і допуску до експлуатації несправного амортизатора. Метод нечутливий до зміни підресорної маси в межах +40% від номінальної та малочутливий (у межах 15%) до зміни внутрішнього тиску в шині. Загалом метод не демонструє визначальних переваг порівняно з існуючим, реалізованим у серійному стенді MAXA EUROSYSYSTEM MSD 3000.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Daniel Graupe. Identification of System. Colorado State University, Fort Collins. Robert E. Krieger Publishing Company. Huntington. New York, 1976.
2. SAT USB M - TRONIC Тестер амортизаторів на автомобілі. вебсайт. URL: https://www.m-tronic-dt.de/index.php?option=com_content&view=article&catid=1%3Astosdaempfertester-s-a-t-usb&id=9%3As-a-t-usb&Itemid=3&lang=ru (дата звернення 24.01.2025)
3. Техническое обслуживание, ремонт и хранение автотранспортных средств: Учебник: В 3 кн. К.: Выща шк., 1991. – Кн. 1. Теоретические основы. / В.Е. Канарчук, А.А. Лудченко, И.П. Курников, И.А. Луйк. – 359 с. ил.
4. EUSAMA (1976) Recommendation for Performance Test Specification of on Car Vehicle Suspension Testing System, EUSAMA-TS-02-76.
5. Suspension tester and method. Patent USA 5369974A, приор.1992-11-10, публ. 1994-12-06.
6. Z Lozia and P Zdanowicz Simulation assessment of the impact of inertia of the vibration plate of a diagnostic suspension tester on results of the EUSAMA test of shock absorbers mounted in a vehicle. doi:10.1088/1757-899X/421/2/022018
7. MSD 3000 Stend proverki dempfiroyushih svojstv podvesok avtomobilej : вебсайт. URL: <https://autom.com.ua/ru/stend-proverki-amortizatorov-msd-3000-euro-maha-germaniya> (дата звернення 24.01.2025)
8. Marek Guzek, Piotr Zdanowicz* Diagnostics of the on-vehicle shock absorber testing .
9. Lozia, Z. (2021). Assessment of the usability of EUSAMA and the phase angle method in examining the condition of shock absorbers installed in a vehicle. WUT Journal of Transportation Engineering, 132, 61-79, ISSN: 1230-9265, DOI: 10.5604/01.3001.0015.2778.

10. Tomasz L. Stańczyk¹, Rafał Jurecki. Analiza porównawcza metod badania amortyzatorów hydraulicznych. - Zeszyty naukowe instytutu pojazdów 4(100)/2014 pp 25-45.
11. Prof. Dipl.-Ing. Joensen Reimpell. Fahrwerktechnik: Stoss – und Schwingungsdaempfer – Feder und Daemferbeine – Konstruktion und Einbau. – Vogel – Buchverlag, Wuerzburg.
12. ДСТУ 2474-94. Механічні коливальні системи. Терміни та визначення.
13. Описание типа средства измерений. вебсайт. URL: <https://media.belgim.by/grsi/11157.pdf> (дата звернення 24.01.2025)
14. Calvo J.A., Diaz V., San Román J.L.: Establishing inspection criteria to verify the dynamic behaviour of the vehicle suspension system by a platform vibrating test bench. International Journal of Vehicle Design. 2005, 38(4), 290–306, DOI: 10.1504/IJVD.2005.007623.
15. Calvo J.A., San Román J.L., Alvarez-Caldas C.: Procedure to verify the suspension system on periodical motor vehicle inspection. International Journal of Vehicle Design. 2013, 63(1), 1–17, DOI: 10.1504/IJVD.2013.055497
16. Дитятєв О.В. Щодо питання вибору типу вібростенду для діагностування підвіски автомобіля. У науковому журналі «СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ» №2 (21) ЛУЦЬК 2023 с.91...100. DOI 10.36910/automash.v2i21.1213

REFERENCES

1. Daniel Graupe. Identification of System. Colorado State University, Fort Collins. Robert E. Krieger Publishing Company. Huntington. New York, 1976.
2. SAT USB M - TRONIC Tester amortizatoriv na avtomobili. websajt. URL: https://www.m-tronic-dt.de/index.php?option=com_content&view=article&catid=1%3Astosssdaempfertester-s-a-t-usb&id=9%3As-a-t-usb&Itemid=3&lang=ru (data zvernennya 24.01.2025)
3. Tehnicheskoe obsluzhivanie, remont i hranenie avtotransportnyh sredstv: Uchebnik: V 3 kn. K.: Vysha shk., 1991. – Kn. 1. Teoreticheskie osnovy. / V.E. Kanarchuk, A.A. Ludchenko, I.P. Kurnikov, I.A. Lujk. – 359 s. il.
4. EUSAMA (1976) Recommendation for Performance Test Specification of on Car Vehicle Suspension Testing System, EUSAMA-TS-02-76.
5. Suspension tester and method. Patent USA 5369974A, prior.1992-11-10, publ. 1994-12-06.
6. Z Lozia and P Zdanowicz Simulation assessment of the impact of inertia of the vibration plate of a diagnostic suspension tester on results of the EUSAMA test of shock absorbers mounted in a vehicle. doi:10.1088/1757-899X/421/2/022018
7. MSD 3000 Stend proverki dempfiruyushih svojstv podvesok avtomobilej : websajt. URL: <https://autom.com.ua/ru/stend-proverki-amortizatorov-msd-3000-euro-maha-germaniya> (data zvernennya 24.01.2025)
8. Marek Guzek, Piotr Zdanowicz* Diagnostics of the on-vehicle shock absorber testing .
9. Lozia, Z. (2021). Assessment of the usability of EUSAMA and the phase angle method in examining the condition of shock absorbers installed in a vehicle. WUT Journal of Transportation Engineering, 132, 61-79, ISSN: 1230-9265, DOI: 10.5604/01.3001.0015.2778.
10. Tomasz L. Stanczyk¹, Rafał Jurecki. Analiza porownawcza metod badania amortyzatorow hydraulicznych. - Zeszyty naukowe instytutu pojazdow 4(100)/2014 pp 25-45.
11. Prof. Dipl.-Ing. Joensen Reimpell. Fahrwerktechnik: Stoss – und Schwingungsdaempfer – Feder und Daemferbeine – Konstruktion und Einbau. – Vogel – Buchverlag, Wuerzburg.
12. DSTU 2474-94. Mehanichni kolivalni sistemi. Termini ta viznachennya.
13. Opisanie tipa sredstva izmerenij. websajt. URL: <https://media.belgim.by/grsi/11157.pdf> (data zvernennya 24.01.2025)
14. Calvo J.A., Diaz V., San Roman J.L.: Establishing inspection criteria to verify the dynamic behaviour of the vehicle suspension system by a platform vibrating test bench. International Journal of Vehicle Design. 2005, 38(4), 290–306, DOI: 10.1504/IJVD.2005.007623.
15. Calvo J.A., San Roman J.L., Alvarez-Caldas C.: Procedure to verify the suspension system on periodical motor vehicle inspection. International Journal of Vehicle Design. 2013, 63(1), 1–17, DOI: 10.1504/IJVD.2013.055497
16. Dityatyev O.V. Shodo pitannya viboru tipu vibrostendu dlya diagnostuvannya pidviski avtomobilya. U naukovomu zhurnali «SUCHASNI TEHNOLOGIYI V MASHINOBUDUVANNI TA TRANSPORTI» №2 (21) LUCK 2023 s.91...100. DOI 10.36910/automash.v2i21.1213

O. Dityatyev. To the analysis of a new method for diagnosing shock absorbers in the suspension of a car.

The most important operational properties of a car include safety, which is realized through stability, controllability, and reliability of tire contact with the road. During operation, the shock absorber parameters deteriorate with age, reducing safety and comfort. This leads to the need to periodically monitor the condition of shock absorbers using diagnostic tools. Non-disassembly diagnostics is widely used, since assembly and disassembly work is very laborious and requires the use of special equipment and qualified specialists. Bench testing using excitation of the suspension with a periodic signal has gained the overwhelming advantage. However, when testing the suspension assembly, the shock absorber testing report contains information about other suspension components, for example, about the sprung mass and the stiffness (internal pressure) of the tire. In this case, it is not the shock absorber that is tested, but the suspension. Certain diagnostic methods to one degree or another reduce the negative impact of extraneous factors during the diagnosis of shock absorbers. New methods are proposed with advantages in productivity, accuracy of diagnosis, based on the theory of dynamics of mechanical systems, spectral processing of diagnostic information. In this work, a new method is analyzed by the method of simulation modeling - the peak selection method, also called the half-power method, the Calvo method in comparison with the existing one, implemented in the design stand of the MAXA EUROSISTEM company. The analysis was carried out according to the criteria of dependence on the sprung mass, internal tire pressure, sensitivity.

Keywords: shock absorber diagnostics, methods, modeling, analysis, accuracy, extraneous factors.

ДИТЯТЬЄВ Олександр Васильович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри експлуатації та сервісу автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет e-mail: alex-dit@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0004-1897-8813>

DITYATYEV O. – Ph. D. (Ing.), Senior Research Fellow, Associate Professor of the Department of Technical operation and service of cars, Kharkiv National Automobile and Highway University e-mail: alex-dit@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0004-1897-8813>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1724

Захарчук В.І., Захарчук О.В., Швабюк В.В., Ярошук В.В.
Луцький національний технічний університет

ПЕРЕОБЛАДНАННЯ ДИЗЕЛЯ ДЛЯ РОБОТИ НА ПРОПАН-БУТАНІ

Вирішувалась проблема зменшення собівартості перевезень за рахунок використання дешевшого моторного палива. Газові палива (природний газ та пропано-бутанові суміші) є перспективними моторними паливами. Технології переобладнання бензинових двигунів на живлення газовими паливами давно і є добре відпрацьованими. На першому етапі робіт переобладнано дизель Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на природному газі. Демонтовано дизельну паливну апаратуру, встановлено елементи системи запалювання та газову паливну апаратуру, зменшено ступінь стиску двигуна до 12 одиниць. Проведено стендові випробування двигуна, в результаті яких отримані його навантажувальні та регулювальні характеристики. Встановлено, що потужність газового двигуна на рівні базового дизеля, його еквівалентна витрата палива до 19 % більша в результаті його роботи на більш багатих сумішах, сумарна токсичність відпрацьованих газів майже в два рази менша у порівнянні з дизелем. Але природний газ має ряд суттєвих недоліків. Тому здійснено переобладнання двигуна для роботи на пропано-бутанових сумішах. Аналіз властивостей газових палив показав, що пропан-бутан має меншу детонаційну стійкість у порівнянні з природним газом. Запис сигналу датчика детонації засвідчив про наявність детонації при розгонах двигуна під навантаженням. Тому на основі розрахунків робочого циклу двигуна вибрано значення ступеня стиску 11. Зменшення ступеня стиску виконано встановленням товстішої металевої прокладки між двома штатними металоазбестовими прокладками. Стендові випробування двигуна на пропан-бутані показали збільшення еквівалентної витрати палива у порівнянні з роботою на природному газі та на дизельному паливі. Це пояснюється роботою двигуна на більш багатих паливо-повітряних сумішах. Потужність на рівні базового дизеля.

Ключові слова: дизель, газовий двигун, іскрове запалювання, природний газ, пропан-бутан

ВСТУП

Використання альтернативних видів палива є перспективним шляхом до скорочення викидів шкідливих речовин від двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), а природний газ (ПГ) є провідним варіантом. Викиди забруднюючих речовин від згоряння природного газу нижчі, ніж викиди від згоряння бензину чи дизельного палива [1], [2], і він широко доступний із розвинутою інфраструктурою зберігання та розподілу. ПГ також можна легко виробляти з відновлюваних джерел, що гарантує, що технологія, розроблена для ПГ, залишатиметься актуальною, оскільки дизельне паливо буде замінено стійким відновлюваним ресурсом.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Кілька недавніх оглядів публікацій встановили сильні та слабкі сторони сучасних двигунів внутрішнього згоряння, працюючих на природному газі [1], [3], [4], [5], [6], [7], включаючи двигуни з іскровим запалюванням (SI), двопаливні (NG, дизель) і технології прямого впорскування високого тиску (HPDI). Дуже низькі викиди можуть бути досягнуті за допомогою технології SI NG, яка використовує стехіометричну роботу з 3-компонентним нейтралізатором [8], але двигуни SI та двопаливні двигуни мають вихідну потужність, обмежену детонацією, і мають меншу ефективність порівняно зі звичайними дизельними двигунами. Двигуни на газовому паливі та газодизелі страждають від високих викидів метану [7], що призводить до значного впливу парникових газів [1]. Технологія HPDI забезпечує високу продуктивність і високу ефективність, але вимагає звичайної технології доочищення продуктів згоряння для контролю викидів NO_x і твердих частинок (PM). HPDI також вимагає високого тиску впорскування природного газу 300 бар або більше [9], що має негативні наслідки для бортових вимог до зберігання природного газу та паразитних втрат на стиснення природного газу.

Але ПГ має ряд недоліків: значна маса газових балонів та зменшення внаслідок цього вантажоспроможності автомобіля; менший пробіг автомобіля до заправки; більша вартість переобладнання.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є зменшення собівартості перевезень застосуванням дешевшого палива та розширення паливної бази підприємств автомобільного транспорту.

Завдання роботи:

виконати переобладнання двигуна для роботи на пропано-бутанових сумішах;

виконати експериментальні дослідження газового двигуна з іскровим запалюванням.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На першому етапі було виконане переобладнання дизеля Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на природному газі. Параметри базового дизеля показані в табл. 1. Метою було здійснити найпростіше переобладнання, яке можна виконувати в умовах невеликих підприємств. Конвертацію дизеля здійснено з мінімальними витратами коштів за рахунок використання серійного газового обладнання, серійної системи запалювання бензинового двигуна МеМЗ-245 і невеликих змін у конструкції двигуна. Зокрема ступінь стиснення було зменшено з 16 до 12 встановленням додаткових прокладок головки циліндрів. Тому є можливість відновлення роботи за дизельним процесом.

Таблиця 1 – Показники дизеля Д-243

Параметр	Значення
Номинальна потужність, кВт	59
Частота обертання при номінальній потужності	2200
Ступінь стиску	16
Питома ефективна витрата палива, кг/кВт год	0,238

Експериментальні дослідження газового двигуна підтвердили його працездатність в усьому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів із максимальною потужністю, більшою на 1,98...4,3 %, та вищою еквівалентною питомою ефективною витратою пального до 20,5 %, ніж у дизеля, при цьому склад газоповітряної суміші близький до стехіометричного. Перед проведенням експериментів було визначено і встановлено оптимальний кут випередження запалювання.

На другому етапі за тією ж самою технологією виконане переобладнання дизеля в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на пропано-бутанових сумішах (рис. 1). Був встановлений газовий редуктор для скрапленого нафтового газу, виконано регулювання складу суміші, встановлений оптимальний кут випередження запалювання для роботи на даному виді палива.



Рисунок 1 – Газовий двигун з іскровим запалюванням, переобладнаний з дизеля Д-243 для роботи на пропано-бутанових сумішах

Результати досліджень. Фізико-хімічні властивості газових палив наведені в табл. 1.

З таблиці 1 видно, що основні показники пропан-бутану є прийнятними для його використання в якості моторного палива в переобладнаних з дизелів газових двигунах. Але октанове число пропано-бутанових сумішей менше, ніж природного газу. Тому на блоку циліндрів газового двигуна був встановлений датчик детонації (рис. 2) і через осцилограф Instrustar PC-Oscilloscope був здійснений на ноутбук запис його сигналу при розгонах двигуна під навантаження. Фрагмент цих записів показаний на рис. 3. Можемо бачити наявність детонації.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники основних вуглеводневих газів

Показник	Паливо			
	Природний газ	Пропан	Бутан	Дизельне паливо (для порівняння)

Нижча теплота згоряння, МДж/кг	48,7	45,7	45,4	42,5
Нижча теплота згоряння паливоповітряної суміші при певному значенні коефіцієнта надлишку повітря, МДж/м ³	3,11 (при $\alpha=1,0$)	3,46 (при $\alpha=1,0$)	3,41 (при $\alpha=1,0$)	3,2 (при $\alpha=1,2$)
Октанове число	110...130	105	94	-



Рисунок 2 – Встановлення датчика детонації на блоку циліндрів газового двигуна



Рисунок 3 – Сигнал датчика детонації в газовому двигуні

Були виконані розрахунки робочого циклу газового двигуна на пропан-бутані при різних значеннях ступеня стиску, основні результати яких показані в табл. 2. Розрахунки виконані для коефіцієнта надлишку повітря 1,15 та коефіцієнта використання тепла 0,8. Значення температури робочого тіла наприкінці згоряння в газовому двигуні більші, ніж в дизеля, але не перевищують допустимих значень для двигуна з іскровим запалюванням. Встановлено, що доцільним значенням ступеня стиску є 11.

Таблиця 2. Залежності показників газового двигуна Д-243Г від ступеня стиску

Показник	Ступінь стиску		
	$\epsilon=10$	$\epsilon=11$	$\epsilon=12$
Ефективна потужність, кВт	56,3	59,1	61,6
Питома ефективна витрата палива, кг/кВт год	0,277	0,265	0,255
Тиск в надпоршневому просторі наприкінці згоряння, МПа	3,6	4,1	4,6
Температура робочого тіла наприкінці згоряння, К	2125	2149	2170

Був проведений перший етап стендових випробувань двигуна на пропан-бутані. Під час досліджень визначались: сила, яка створює навантаження на двигун, час витрати дози палива та коефіцієнт надлишку повітря α . Далі розрахунком за відомими залежностями визначався крутий

момент двигуна, ефективна потужність та годинна витрата палива G_p (табл. 3). Для визначення коефіцієнта надлишку повітря α у вихлопній трубі був встановлений кисневий датчик (рис. 4), сигнал якого виводився на ноутбук через контролер STAG AFR широкополосного λ - зонда. Детонація двигуна відсутня.

Таблиця 3 – Результати стендових випробувань газового двигуна

Показник	Ефективна потужність, кВт					
	6,0	10,0	21,0	31,0	35,0	42,0
G_p , кг/год	4,1	5,0	7,0	8,1	10,0	11,2
α	1,03	1,15	1,15	1,15	1,15	1,11

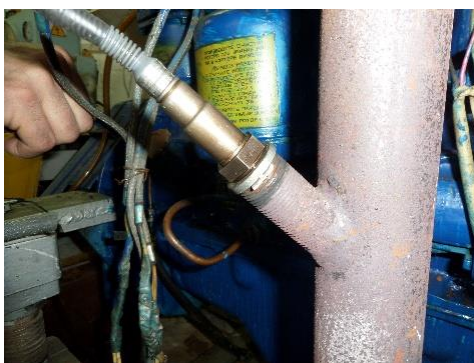


Рисунок 4 – Встановлення датчика вільного кисню у вихлопній трубі газового двигуна

Зменшення ступеня стиску газового двигуна з 12 до 11 виконано встановленням товстішої металевої прокладки між двома штатними металоазбестовими прокладками, як показано на рис. 5.

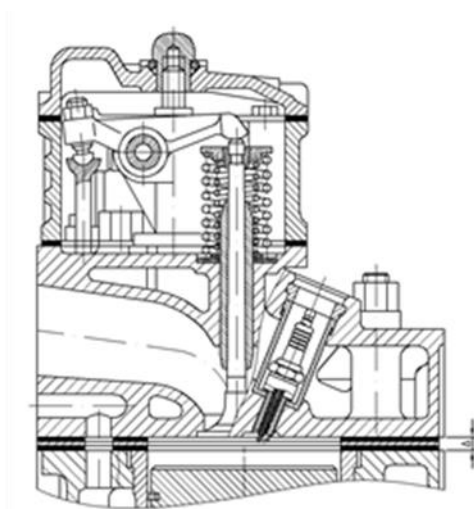


Рисунок 5 – Встановлення додаткової прокладки головки циліндрів

Потужність двигуна при роботі на пропан-бутані залишилась на рівні базового дизеля. Витрата палива є дещо більшою. Це пояснюється роботою газового двигуна на більш багатих сумішах.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Газові палива (природний газ та пропано-бутанові суміші) є перспективними моторними паливами. Пропан-бутан має ряд переваг перед природним газом. Технології переобладнання бензинових двигунів на живлення пропано-бутановими сумішами відомі ще з 70-х років минулого століття і є добре відпрацьованими. Але зараз на вантажних автомобілях і автобусах переважно встановлюються дизелі. І якщо дослідженню переобладнаних з дизелів газових двигунів на природному газі вже присвячена певна кількість робіт, то дослідження таких двигунів на пропан-бутані практично відсутні. Це підтверджує актуальність даних досліджень.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз властивостей пропан-бутану показав, що він є хорошим паливом для двигунів з іскровим запалюванням з високим ступенем стиску. Виконано переобладнання дизеля, встановленого на стенді, в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на пропан-бутані.

2. Результати стендових випробувань двигуна на пропано-бутанових сумішах підтвердили роботоздатність газового двигуна. Отримані енергетичні та паливо-економічні показники підтвердили доцільність переобладнання дизелів для роботи на пропан-бутані. Це дозволить зменшити собівартість перевезень за рахунок використання дешевшого палива. Наступним етапом робіт є отримання характеристик двигуна з заміром концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Korakianitis, T., Namasivayam, A.M., Crookes, R.J. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions / Prog Energy Combust Sci, 03601285, 37 pp. 89-112. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128510000377>.

2. Saanum, I., Bysveen, M., Tunestål, P., Johansson, B. (2007). Lean burn versus stoichiometric operation with EGR and 3-way catalyst of an engine fueled with natural gas and hydrogen enriched natural gas / SAE Tech Pap. <https://saemobilus.sae.org/papers/lean-burn-versus-stoichiometric-operation-egr-3-way-catalyst-engine-fueled-natural-gas-hydrogen-enriched-natural-gas-2007-01-0015>.

3. Chala, G.T., Aziz, A.R.A., Hagos, F.Y. (2018). Natural gas engine technologies: Challenges and energy sustainability issue / Energies, 19961073, 11, <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2934>.

4. Chen, H., He, J., Zhong, X. (2019). Engine combustion and emission fuelled with natural gas: A review/ J Energy Inst, 17460220, 92. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967118304446?via%3Dihub>.

5. Li, M., Wu, H., Zhang, T., Shen, B., Zhang, Q., Li, Z. (2020). A comprehensive review of pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: Factors affecting combustion, emissions and performance/ Renew Sustain Energy Rev, 18790690, 119. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119308597?via%3Dihub>.

6. Algayyim, S.J.M., Saleh, K., Wandel, A.P., Fattah, I.M.R., Yusaf, T., Alrazen, H.A. (2024). Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: A review/ Fuel, 00162361, 362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123034580?via%3Dihub>.

7. Wei, L., Geng, P. (2016). A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance/ Fuel Process Technol, 03783820, 142 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382015301715?via%3Dihub>.

8. Draper, R., Lenski, B., Foltz, F.J., Beazley, R., Tenny, W. (2017). Measured and predicted performance of a downsized, medium duty, natural gas engine/ SAE Tech Pap, 01487191, 2017-March <https://saemobilus.sae.org/papers/measured-predicted-performance-a-downsized-medium-duty-natural-gas-engine-2017-01-0775>.

9. McTaggart-Cowan, G., Mann, K., Huang, J., Singh, A., Patychuk, B., Zheng, Z.X., et al. (2015). Direct injection of natural gas at up to 600 bar in a pilot-ignited heavy-duty engine/ SAE Int J Engines, <https://saemobilus.sae.org/articles/direct-injection-natural-gas-600-bar-a-pilot-ignited-heavy-duty-engine-2015-01-0865>.

10. Zakharchuk, V., Zakharchuk, O., Tolstushko, M., Tolstushko, N. (2024). Improving performance of wheeled tractor with gas engine as part of transport machine unit. Engineering For Rural Development, Vol. 23, 488-494. <http://dx.doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF091>.

REFERENCES

1. Korakianitis, T., Namasivayam, A.M., Crookes, R.J. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions / Prog Energy Combust Sci, 03601285, 37 pp. 89-112. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128510000377>.

2. Saanum, I., Bysveen, M., Tunestål, P., Johansson, B. (2007). Lean burn versus stoichiometric operation with EGR and 3-way catalyst of an engine fueled with natural gas and hydrogen enriched natural gas / SAE Tech Pap. <https://saemobilus.sae.org/papers/lean-burn-versus-stoichiometric-operation-egr-3-way-catalyst-engine-fueled-natural-gas-hydrogen-enriched-natural-gas-2007-01-0015>.

3. Chala, G.T., Aziz, A.R.A., Hagos, F.Y. (2018). Natural gas engine technologies: Challenges and energy sustainability issue / Energies, 19961073, 11, <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2934>.

4. Chen, H., He, J., Zhong, X. (2019). Engine combustion and emission fuelled with natural gas: A review/ J Energy Inst, 17460220, 92. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967118304446?via%3Dihub>.
5. Li, M., Wu, H., Zhang, T., Shen, B., Zhang, Q., Li, Z. (2020). A comprehensive review of pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: Factors affecting combustion, emissions and performance/ Renew Sustain Energy Rev, 18790690, 119. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119308597?via%3Dihub>.
6. Algayyim, S.J.M., Saleh, K., Wandel, A.P., Fattah, I.M.R., Yusaf, T., Alrazen, H.A. (2024). Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: A review/ Fuel, 00162361, 362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123034580?via%3Dihub>.
7. Wei, L., Geng, P. (2016). A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance/ Fuel Process Technol, 03783820, 142 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382015301715?via%3Dihub>.
8. Draper, R., Lenski, B., Foltz, F.J., Beazley, R., Tenny, W. (2017). Measured and predicted performance of a downsized, medium duty, natural gas engine/ SAE Tech Pap, 01487191, 2017-March <https://saemobilus.sae.org/papers/measured-predicted-performance-a-downsized-medium-duty-natural-gas-engine-2017-01-0775>.
9. McTaggart-Cowan, G., Mann, K., Huang, J., Singh, A., Patychuk, B., Zheng, Z.X., et al. (2015). Direct injection of natural gas at up to 600 bar in a pilot-ignited heavy-duty engine/ SAE Int J Engines, <https://saemobilus.sae.org/articles/direct-injection-natural-gas-600-bar-a-pilot-ignited-heavy-duty-engine-2015-01-0865>.
10. Zakharchuk, V., Zakharchuk, O., Tolstushko, M., Tolstushko, N. (2024). Improving performance of wheeled tractor with gas engine as part of transport machine unit. Engineering For Rural Development, Vol. 23, 488-494. <http://dx.doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF091>.

V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, V. Shvabyuk, V. Yaroshuk. Conversion of a diesel engine to operate on propane-butane

The problem of reducing transportation costs by using cheaper motor fuel was addressed. Gaseous fuels (natural gas and propane-butane mixtures) are promising motor fuels. The technologies for converting gasoline engines to run on gaseous fuels have been well-developed for a long time. At the first stage of the work, the D-243 diesel engine was converted into a gas engine with spark ignition to operate on natural gas. The diesel fuel system was removed, ignition system components and gas fuel equipment were installed, and the engine's compression ratio was reduced to 12. Bench tests of the engine were conducted, during which its load and control characteristics were obtained. It was found that the power of the gas engine remained at the level of the base diesel engine, its equivalent fuel consumption was up to 19% higher due to operation on richer mixtures, and the total toxicity of exhaust gases was almost twice as low compared to the diesel engine. However, natural gas has several significant drawbacks. Therefore, the engine was converted to operate on propane-butane mixtures. An analysis of gaseous fuel properties showed that propane-butane has lower detonation resistance compared to natural gas. The knock sensor signal recording confirmed the presence of detonation during engine acceleration under load. Based on engine cycle calculations, a compression ratio of 11 was selected. The compression ratio was reduced by installing a thicker metal gasket between two standard metal-asbestos gaskets. Bench tests of the engine running on propane-butane showed an increase in equivalent fuel consumption compared to operation on natural gas and diesel fuel. This is explained by the engine running on richer air-fuel mixtures. The power remained at the level of the base diesel engine.

Keywords: diesel, gas engine, spark ignition, natural gas, propane-butane.

ЗАХАРЧУК Віктор Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: victavto@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5450-391X>

ЗАХАРЧУК Олег Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: Zaharchukov205@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9265-4647>

ШВАБЮК Володимир Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: shvabyuk@meta.ua. <https://orcid.org/0000-0001-8294-5291>

ЯРОЩУК Віктор Віталійович, аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: victoryaroshuk@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0007-1377-7635>.

Victor ZAKHARCHUK, Doctor of Science in Engineering, Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: victavto@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5450-391X>

Oleg ZAKHARCHUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: Zaharchukov205@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9265-4647>.

Volodymyr SHVABYUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: shvabyuk@meta.ua. <https://orcid.org/0000-0001-8294-5291>

Viktor YAROSCHUK, graduate student of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: victoryaroshuk@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0007-1377-7635>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1725

УКРАЇНСЬКИЙ РИНОК АВТОМОБІЛІВ-ГІБРИДІВ

Зростання кількості автомобілів з електричними силовими установками є частиною світової тенденції переходу на екологічно чистий транспорт, адже подібні транспортні засоби вважаються одним із ефективних способів добитися зменшення забруднення навколишнього середовища.

Переведення автомобільного парку України на електромобілі та гібриди одне з актуальних завдань для держави, оскільки електрична енергія справедливо вважається доступним у необхідній кількості альтернативним джерелом енергії. Чим більше у країні буде подібних транспортних засобів, тим менше Україна залежатиме від імпорту пального.

Сьогодні у ЗМІ, інших джерелах інформації можна зустріти такі позначення автомобілів, обладнаних різними електричними силовими установками: NEV, EV, BEV, HEV, PHEV, MHEV, FHEV, EREV і FCEV. У роботі розшифровуються ці абревіатури та наводяться короткі характеристики авто.

Приналежність електромобіля до того чи іншого виду відображається у Митному кодексі України через присвоєння йому коду УКТЗЕД. Це, відповідно, впливає на розміри платежів при ввезенні транспортних засобів на митну територію України, зокрема кодом 8703 80 10 10 позначається BEV, а кодом 8703 80 10 90 – EREV. Фіскальні чинники безпосередньо пов'язані з вітчизняним ринком легкових автомобілів, на що вказує проведення у роботі аналіз за останнє десятиліття.

Оскільки популярність гібридних автомобілів зростає, країни з високим рівнем автомобілізації вживають заходів, метою яких є збільшення їх кількості, зокрема шляхом державного стимулювання. Подібне майже не спостерігається в українському законодавстві, натомість вітчизняний парк автомобілів-гібридів за останніх 5 років зріс більше ніж у тричі: з 29,2 тис. одиниць у 2020 році до 98,1 тис. у 2024-му.

Помітно змінилися уподобання українських споживачів щодо силових агрегатів автомобілів. У 2024 році 33% ринку серед нових авто вже охопили електромобілі і гібриди, включно, з EREV потіснивши таким чином легковики з бензиновими і дизельними двигунами. Однак з огляду на нинішнє зацікавлення світових автовиробників у розширенні модельного ряду за рахунок транспортних засобів зі збільшеним запасом ходу, а також зміни у Митному кодексі України, до кінця десятиліття можливе зростання популярності саме цього різновиду електромобіля на вітчизняному ринку.

Ключові слова: електромобіль, автомобіль-гібрид, EREV, ринок і парк гібридів, статистика, Митний кодекс, акциз.

ВСТУП

Світовий ринок автомобілів, оснащених електричними силовими установками, зростає з кожним роком, і прогнози передбачають збереження цієї тенденції. У 2023 році продаж електромобілів і автомобілів-гібридів досяг 17,1 млн. одиниць (див. рис. 1) [1]. На відміну від «чистих» електричних авто, частка гібридів складає менше половини від загальної кількості, однак і тут спостерігається прогрес. Так, якщо у 2020 році було продано 970 тис. нових автомобілів-гібридів, то у продовж останніх чотирьох років цей сегмент зріс у шість разів (див. рис. 1) [1, 2].

Попри позитивну динаміку, подальший розвиток ринку супроводжується певною невизначеністю. Згідно зі сценарієм заявленої політики (STEPS), загальний обсяг продажів електромобілів перевищить 20,0 млн у 2025 році та понад 40,0 млн у 2030 році, що складе, відповідно, понад 20% та 30...35% від усіх продажів. За цим же сценарієм, до 2030 року електромобілі охоплять більше 10% дорожніх транспортних засобів – частки світового парку автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) [3].

Попри зростання продажів, ринок електромобілів залишається зосередженим у кількох ключових регіонах. У 2024 році 64,3% реєстрацій нових електромобілів було зафіксовано у Китаї, 17,5% – у ЄС, Європейській асоціації вільної торгівлі і Великобританії, 10,5% – у США і Канаді, що становить понад 92% світових продажів разом узятих [1]. На рисунку 2 показаний розподіл 10,63 млн автомобілів європейського ринку за видами двигунів у 2024 році [4].

Загалом зростання кількості автомобілів з електричними силовими установками є частиною світової тенденції переходу на екологічно чистий транспорт, адже такі транспортні засоби вважаються одним із ефективних способів зниження рівня забруднення навколишнього середовища та протидії зміні клімату.

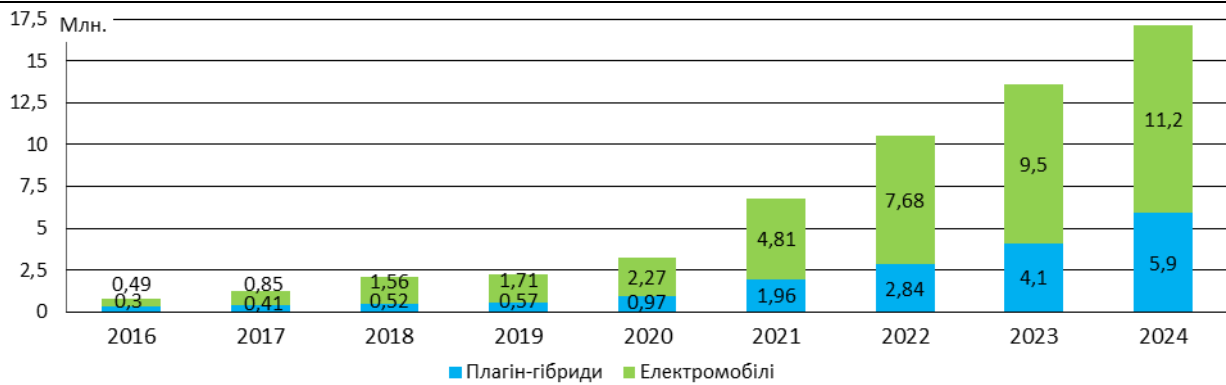


Рисунок 1 – Динаміка світового продажу легкових електромобілів і плагін-гібридів

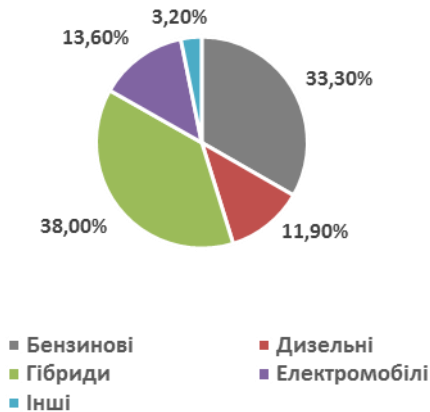


Рисунок 2 – Розподіл європейського ринку легковиків за видами двигунів (силових агрегатів) у 2024 році

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Переведення автомобільного парку України на електромобілі та гібриди питання досить актуальне, оскільки електрична енергія сьогодні – єдине прийнятне та доступне у необхідній кількості джерелом енергії, що може бути використане як альтернативне. Чим більше у країні буде таких автомобілів, тим менше Україна залежатиме від імпорту пального. Необхідність скорочення споживання нафтопродуктів сприяла виходу на вітчизняний ринок не лише «чистих» електромобілів, але й автотранспортних засобів з новими типами силових агрегатів, у яких робота двигунів внутрішнього згоряння поєднується з електричними.

Автомобілі-гібриди NEV (New Energy Vehicles)

з «новою енергією» включають гібриди, електромобілі з повним акумулятором і електромобілі на паливних елементах. Сьогодні у побуті та професійному середовищі можна зустріти аббревіатури EV, BEV, HEV, PHEV, MHEV, FHEV, EREV і FCEV (див. табл. 1) [5, 6]. «Чистий» електромобіль EV (Electric Vehicle) або BEV (Battery Electric Vehicle) означає «електричний транспортний засіб» чи «електромобіль на батареї» відповідно, приводиться у рух виключно електрикою. Він не має двигуна внутрішнього згоряння і потребує живлення від зовнішнього джерела електроенергії.

Гібриди HEV (Hybrid Electric Vehicle) використовують електроенергію як доповнення до основного, традиційного двигуна та є проміжною ланкою між транспортними засобами з ДВЗ і власне електричними. Вони оснащені двома джерелами енергії, що забезпечує (за наявності пального в баку) продовження руху. Головним завданням гібридних автомобілів стало зменшення витрат пального та рівня викидів шкідливих газів. Першим у світі масовим гібридним легковим автомобілем став Prius фірми TOYOTA, який надійшов у продаж в Японії у 1997 році. Наразі сформувалися чотири основні типи таких автомобілів.

Гібриди Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – «м'які гібриди» оснащені системою, яка передбачає відносно незначне втручання у звичну конструкцію автомобіля з ДВЗ. Типові MHEV мають посилений стартер або стартер/генератор, який «допомагає» двигуну внутрішнього згоряння під час старту, прискоренні чи обгоні та невелику 48-вольтну додаткову батарею, що накопичує енергію, отриману від рекуперації під час гальмування. Окремі з них здатні долати на електротязі досить обмежену дистанцію (2...5 км), проте основне призначення таких «самозарядних» систем – зменшення викидів шкідливих речовин завдяки зниженню навантаження на ДВЗ.

«М'які» гібриди є найпростішим рішенням, відповідно, й виграш у плані економії пального та збереження довкілля менший, ніж у інших типів гібридів. Подібними системами оснащені дизельні автомобілі PEUGEOT і CITROEN з технологією e-HDi та VOLKSWAGEN Golf 8 MHEV.

У повних гібридах Full Hybrid Electric Vehicle (FHEV) електродвигун приводить в рух автомобіль і отримує енергію від акумулятора або двигуна внутрішнього згоряння. Вони оснащені достатньо потужним ДВЗ та самодостатнім електроприводом, що передають свою потужність на колеса почергово або одночасно. Автомобіль має повноцінну гібридну силову установку та здатен

проїхати кілька кілометрів на одному лише електроприводі, що сприяє суттєвому зниженню споживання пального та шкідливих викидів. Як і «м'які» гібриди, такі авто заряджають батарею самостійно. В Україні вони досить поширені, зокрема це TOYOTA RAV4 Hybrid, TOYOTA Corolla Cross Hybrid, TOYOTA Camry Hybrid, NISSAN Qashqai Hybrid, NISSAN X-Trail Hybrid та інші.

Таблиця 1 – Класифікація електромобілів за типом силового агрегату

Різновид електромобіля	Абревіатура	Переклад (тлумачення)
Battery Electric Vehicles	BEV	Повністю електричний автомобіль («чистий електромобіль»)
Hybrid Electric Vehicles	HEV	Гібридний електромобіль
Mild Hybrid Electric Vehicle	MHEV	«М'який гібрид» або «малий гібрид»
Full Hybrid Electric Vehicle	FHEV	Повний гібридний електромобіль
Plug-in Hybrid Electric Vehicles	PHEV	Плагін-гібридний електромобіль (або «гібрид, що підзаряджається»)
Electric Range Extended Vehicle	EREV	Електромобіль зі збільшеним запасом ходу
Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles	FCEV	Водневий автомобіль (електромобіль на водневих паливних елементах)

Гібриди Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV) – це автомобілі з додатковим до ДВЗ електричним двигуном (або кількома) та тяговою батареєю, яку можна заряджати від зовнішнього джерела струму. Головна перевага таких авто (їх ще називають «підзарядні плагін-гібриди») наявність місткої батареї, що дає змогу долати значні відстані (зазвичай 60...100 км і більше) виключно на електричній тязі, вмикаючи ДВЗ лише під час тривалих подорожей. Вони дозволяють економити пальне, зменшувати шкідливі викиди та не надто залежати від зарядних станцій. В Україні представлено чимало плагін-гібридів з абревіатурою PHEV: MITSUBISHI Outlander PHEV, MERCEDES-BENZ GLE 350de PHEV, TOYOTA RAV4 PHEV тощо.

Повні та «м'які» гібриди мають функцію самозарядки. PHEV може заряджатися самостійно, проте, щоб максимально використати переваги гібридної технології, йому необхідна зовнішня підзарядка від станції чи побутової електророзетки. Водночас плагін-гібриди мають і недоліки: складність конструкції системи «ДВЗ плюс електродвигун» призводить до зростання їх вартості.

Гібриди Electric Range Extended Vehicle (EREV) – це різновид електромобілів зі збільшеним запасом ходу (також відомі як послідовні гібриди), що використовують ДВЗ у поєднанні з генератором для заряджання акумуляторної батареї. Головною рушійною силою таких автомобілів є електродвигуни, а двигун внутрішнього згоряння включається лише за необхідності зарядити батарею (т.з. система «e-Power»). Таким чином, автомобіль EREV продовжує рух як електромобіль, навіть за відсутності можливості підключитися до зарядної станції. Власники послідовних гібридів мають два різні, незалежні варіанти «заправки»: підключення до електромережі для зарядки батареї, використання пального для роботи генератора або обидва варіанти одночасно. До недоліків EREV можна віднести збільшену вагу, складність конструкції та шкідливі викиди від ДВЗ.

Першим серійним прикладом EREV став CHEVROLET Volt, який проїжджав 56...85 км на електротязі, після чого вмикався бензиновий двигун для додаткового пробігу майже 600 км. Пізніше почалося виробництво BMW i3 REx із запасом ходу 240 км, з яких 115 км на батареї.

Автомобілі на паливних елементах Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV) – ідейно це також електричні транспортні засоби. Вони використовують стиснутий водень для зарядки бортових батарей, які живлять електродвигун силового агрегату. Заправка воднем проходить подібно бензину, дальність поїздки не поступається автомобілям з ДВЗ, а рівень викидів вуглецю нульовий. TOYOTA випустила вже друге покоління моделі Mirai на водневих паливних елементах. Власне, TOYOTA та південнокорейська HYUNDAI (також існує два покоління компактного кросовера HYUNDAI Nexon) стали піонерами у виробництві водневих автомобілів. Водночас автомобілі на паливних елементах ще не набули значного поширення порівняно з традиційними, і їхні продажі становлять лише кілька тисяч одиниць на рік.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціллю роботи є аналіз вітчизняного ринку автомобілів-гібридів та дослідження шляхів його формування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Українська класифікація товарів зовнішньоекономічної діяльності (УКТЗЕД) передбачає кодування різноманітних товарів, зокрема транспортних засобів. Відповідно, у Митному тарифі

України у групі 87 «Засоби наземного транспорту...» представлені електромобілі й автомобілі-гібриди з присвоєними кодами та розмірами мита для них.

Загальна група легковиків має код УКТЗЕД 8703 і називається «Автомобілі легкові та інші моторні транспортні засоби, призначені головним чином для перевезення людей (крім моторних транспортних засобів товарної позиції 8702), включаючи вантажопасажирські автомобілі-фургони та гоночні автомобілі». Подальший поділ наведено у таблиці 2. Під аналогічною назвою, але окремим кодом позначалися транспортні засоби, що використовувалися. Залежно від підгрупи, до якої відноситься транспортний засіб, встановлюється розмір мита [7].

Таблиця 2 – Кодифікація легкових електромобілів і автомобілів-гібридів, як товару

Код УКТЗЕД	Назва	Вид автомобіля
8703 40 10 80 (90)	– інші транспортні засоби з поршневим двигуном внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням та електродвигуном в якості двигунів для пересування, крім тих, які здатні заряджатися шляхом підключення до зовнішнього джерела електроенергії, нові; – інші	MHEV FHEV
8703 50 00 00	інші транспортні засоби, з поршневим двигуном внутрішнього згоряння із запалюванням від стиснення (дизелем або напівдизелем) і електродвигуном в якості двигунів для пересування, крім тих, які здатні заряджатися шляхом підключення до зовнішнього джерела електроенергії	MHEV FHEV
8703 60 10 80 (90)	– інші транспортні засоби з поршневим двигуном внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням та електродвигуном в якості двигунів для пересування, які здатні заряджатися шляхом підключення до зовнішнього джерела електроенергії, нові; – інші	PHEV
8703 70 00 00	– інші транспортні засоби з поршневим двигуном внутрішнього згоряння із запалюванням від стиснення (дизелем або напівдизелем) і електродвигуном в якості двигунів для пересування, які здатні заряджатися шляхом підключення до зовнішнього джерела електроенергії	PHEV
8703 80 10 10	– інші транспортні засоби, що приводяться в рух тільки електричним двигуном, оснащені виключно електричними двигунами (одним чи декількома); нові	BEV
8703 80 10 90	– оснащені двигуном внутрішнього згоряння, який не з'єднаний з трансмісією, тобто не бере участі в пересуванні транспортного засобу, який призначений тільки для обертання електрогенератора, та інші транспортні засоби	EREV

Перші автомобілі-гібриди в Україні офіційно з'явилися одночасно з електромобілями у 2012 році. Оскільки власного виробництва ані гібридів, ані електромобілів не було, то їх завозили з-за кордону. Подальше формування автомобільного парку проходило аналогічним чином. На рисунку 3 показана динаміка реєстрації електромобілів і гібридів за останні десять років [8, 9].

Як видно з графіка, продаж автомобілів-гібридів змінювався відносно електромобілів: у деякі роки переважали «чисті» електромобілі, в інші – гібриди, а в окремі періоди їхня реалізація була майже однаковою. І лише у 2023–2024 роках кількість реєстрацій електромобілів перевищила реєстрації автомобілів-гібридів у 2,1 рази, хоча у 2020–2021 роках спостерігалось аналогічне співвідношення на користь останніх (див. рис. 3).

Сьогодні поповнення вітчизняного парку гібридних авто відбувається переважно завдяки «м'яким» MHEV або повним FHEV гібридам. Продаж підзарядних плагін-гібридів PHEV в Україні залишається незначним через їх завищену вартість. Сегмент гібридів ніколи не мав такої фінансової підтримки з боку держави, як електромобілі. Наприклад, у листопаді 2015 року була встановлена нульова ставка ввізного мита (замість 8% митної вартості) на транспортні засоби, оснащені виключно електродвигунами. У тому ж році було скасовано податок (20%) на додану вартість до 2018 року, а згодом це рішення продовжили. Крім того, акциз на електромобілі з 1 січня 2019 року залежав від місткості акумулятора і становив один євро за кіловат-годину. Вплив цих змін на продажі автомобілів відображено на рисунку 3.

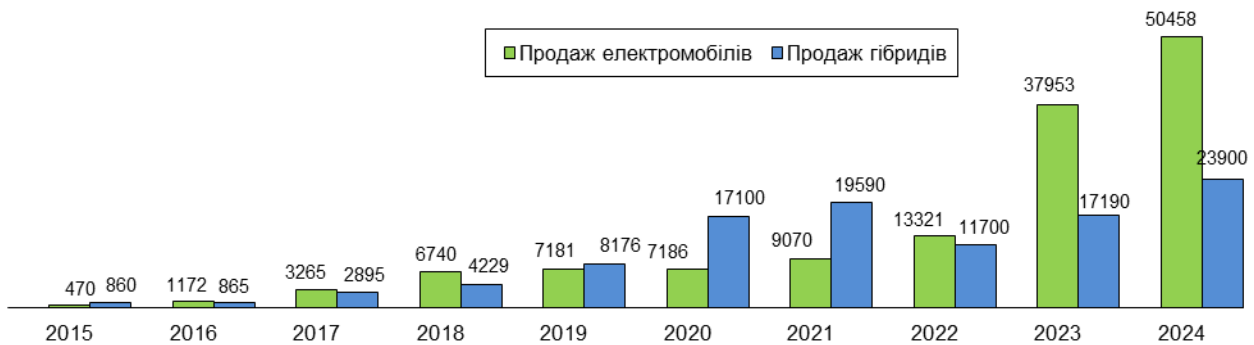


Рисунок 3 – Динаміка реєстрації електромобілів і гібридів у 2015–2024 роках, одиниць

Натомість автомобілі-гібриди оподатковувалися за тими ж митними ставками, що й звичайні транспортні засоби з ДВЗ. Винятком став період з 1 квітня по 30 червня воєнного 2022 року, коли ухвалений Верховною Радою (ВР) закон надавав можливість безкоштовно розмитнювати усі ввезені з-за кордону легковики, включно з гібридами. Однак фінансове послаблення тривало недовго: з 1 липня 2022 року Законом №7418 «нульове» розмитнення було скасовано, окрім спеціального акцизу на електромобілі. Його розмір знову становив один євро за 1 кВт·год ємності батареї, а також було відмінено обов'язковий платіж до Пенсійного фонду [5]. Для гібридів типу EREV встановлювалися окремі умови: мито 8%, ПДВ 20% та акциз у розмірі 100 євро за один транспортний засіб [7, 10].

Статистика продажів автомобілів обладнаних електричними силовими установками засвідчує їх популярність у світі, де з кожним роком частка таких авто на ринку зростає. Країни, які перебувають у лідерах автомобілізації, вживають заходів з метою збільшення кількості електромобілів і гібридів, зокрема шляхом державного стимулювання: надання субсидій на купівлю, пільги на податки тощо. І навпаки, українське законодавство суттєво не впливає на формування вітчизняного парку аналогічних транспортних засобів.

Метод фіскального стимулювання у країнах ЄС передбачає регулювання системи оподаткування транспортних засобів з електричними силовими установками, зокрема звільнення від податку при першій реєстрації чи від щорічних дорожніх зборів. Окрім того, власникам електромобілів доступні спеціальні пільги: безкоштовне паркування, зарядка та рух автобанами, дозвіл пересування смугами, виділеними для громадського транспорту, та в'їзд у заборонені для автомобілів з ДВЗ зони міста тощо.

Європейська Асоціація автовиробників ACEA у 2022 році оприлюднила оновлений перелік пільг та бонусів, які у різних країнах ЄС надаються покупцям і власникам транспортних засобів оснащених електричними силовими установками з мінімальним рівнем шкідливих викидів. Визначені законодавством податки і пільги відрізняються не лише між країнами, але й від того у чийй власності знаходиться транспорт – приватній чи корпоративній.

Станом на 2023 рік 21 країна ЄС (на чотири більше, ніж у 2022 році) пропонувала різноманітні стимули для купівлі електромобілів. Водночас шість країн (у 2022 році таких було десять) відмовилися від стимулювання і обмежилися лише знижками або звільненням від податків. Наразі майже усі 27 країн-членів Європейського Союзу (за винятком Естонії) впроваджують різні форми фіскальної підтримки для популяризації екологічного транспорту [11]. Це може бути як звільнення від податків при купівлі та володінні автомобілем, так і фінансові стимули, зокрема додаткові виплати (бонуси) чи премії для покупців.

Аналіз переліку пільг та бонусів показав, що розмір фіскальних знижок в Європі визначають такі критерії, як рівень викидів CO₂ та запас ходу на електротязі. Популярною є система кешбеку, розмір якого залежить від вартості автомобіля, але не може перевищувати встановлених лімітів. Окремі знижки діють лише у певних містах (Мадриді, Барселоні), або на окремих територіях, наприклад таких як Канарські острови.

Слід також зазначити, що перелік фіскальних стимулів враховує різноманітні конструкції силових установок автомобілів. Інформація щодо гібридів, показана на рисунку 2, в оригіналі була поділена на дві частини: NEV – 30,9%; PHEV – 7,1%. На відміну від України, у деяких європейських країнах податкові пільги поширюються не лише на «чисті» електромобілі (BEV), а й на гібриди NEV (Італія) та плагін-гібриди PHEV (Німеччина) [11]. Також у ЄС передбачені доплати за утилізацію автомобілів залежно від їхнього типу, класу та дати реєстрації. Для корпоративних транспортних

засобів зменшується термін амортизації. Власне, варіантів у переліку пільг та бонусів, якими могли б скористатися депутати Верховної Ради, щоб адаптувати вітчизняне законодавство до європейського, є безліч.

Поєднання різних джерел енергії у гібридних автомобілях дає можливість заощаджувати дефіцитне в Україні паливо, що, як наслідок, дозволяє власнику таких транспортних засобів може здешевити їх експлуатацію. Статистика вітчизняного автомобільного ринку свідчить про зростання зацікавленості споживачів не лише електричними авто, але й автомобілями-гібридами (див. рис 3). Особливо рекордним став 2024 рік, коли було зареєстровано 23900 гібридних легкових автомобілів (HEV та PHEV), що на 39% більше, ніж у 2023-му. Найпопулярніші серед українців автомобілі-гібриди наведені у таблиці 3. Варто також зауважити, що частка нових легковиків становила 14100 одиниць, тобто більше половини – решта були уживані [9]. Динаміка змін вітчизняного парку гібридів за останні 10 років показана у таблиці 4 [12, 13].

Таблиця 3 – Найпопулярніші в Україні гібридні автомобілі у 2024 році

Місце	Нові		Вживані	
	Модель	Кількість	Модель	Кількість
1	TOYOTA RAV-4	3101	FORD Fusion US	896
2	Toyota Camry	781	TOYOTA Prius	609
3	NISSAN Qashqai	777	TOYOTA RAV-4	586

Таблиця 4 – Динаміка зміни вітчизняного парку гібридних авто у 2015–2024 роках, одиниць

Рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Кількість	860	884	5877	9170	12100	29198	47886	57060	74220	98100

Станом на кінець 2024 року український автопарк налічував близько 133,5 тис. електро- і 98,1 тис. гібридних автомобілів. Загалом, за даними Укравтопрому, у 2024 році було зареєстровано 69,6 тис. нових легкових автомобілів і 221,1 тис., що використовувалися. Розподіл українського ринку нових і вживаних легкових автомобілів за типами двигунів (силових агрегатів) у 2024 році показаний на рисунку 4 [14, 15].

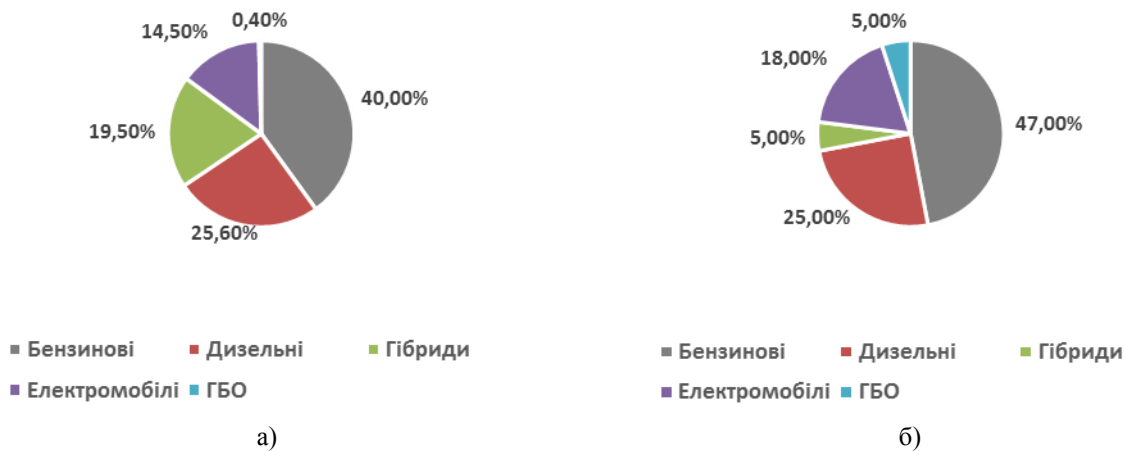


Рисунок 4 – Розподіл українського ринку легкових автомобілів за типами двигунів (силових агрегатів) у 2024 році: а) нові; б) бувші у вжитку

На відміну від ЄС в Україні усі гібриди зараховуються у спільну групу HEV, процедура розмитнення для яких однакова, і пільгами, на відміну від «чистих» електромобілів, вони не наділені. Виняток у розмірах митних платежів зроблено гібридам EREV (код УКТЗЕД 8703 80 10 90), для яких акциз, як вже зазначалося, передбачений у розмірі 100 євро. Якщо їх «перевести» у смість умовної батареї, то це буде 100 кВт·год. – практично верхній показник місткості акумуляторів, якими укомплектована переважна більшість електромобілів включно з бізнес-класом.

Виникає цікава ситуація на українському автомобільному ринку. Вже відомо, що фіскальні пільги для електромобілів діють до 1 січня 2026 року, і депутати Верховної Ради не мають наміру їх надалі продовжувати. За умови також повернення на електромобілі мита у розмірі 8%, митні платежі для автомобілів-однокласників виду BEV і EREV практично зрівняються при однаковій митній вартості транспортних засобів.

Постане питання: що купувати краще? І тут важливу роль відіграють переваги EREV –

послідовного гібрида. «Підливають олії у вогонь» також рішення, які приймають сьогодні автовиробники. Так, у відповідь на уповільнення попиту на свої електроавтомобілі Hyundai Motor розробила на майбутнє стратегію «Динамічні можливості Hyundai», у якій наголос зроблено на подвоєння гібридної лінійки та впровадження електромобілів зі збільшеним запасом ходу. Керівництво компанії має намір таким чином «проскочити» перехідний період до повністю електричних транспортних засобів [16].

Концерн VOLKSWAGEN віродив свій, створений ще у 1961 році, бренд SCOUT під назвою Scout Motors, пропонуючи сучасні автомобілі з історичною спадщиною – позадорожник Traveler і пікап Terra. Для обох моделей доступні два варіанти силових установок: повністю електрична та EREV, однак більшість клієнтів обирають саме версію із подовженим до 805 км запасом ходу. Якщо «чистий» електричний Scout BEV має 560 км пробігу, то у моделі EREV запас ходу лише 240 км на електротязі – решта пробігу забезпечується завдяки бензиновому генератору [17].

Сьогодні на вітчизняному ринку можна знайти вже згадані уживані EREV (оскільки вони більше не випускаються) Chevrolet Volt і BMW і3 REx, а також сучасні нові фірми NISSAN Qashqai e-POWER і X-Trail e-POWER, які доступні в офіційних автосалонах.

У [Nissan Qashqai e-POWER](#) під капотом розташований 1,5-літровий турбодвигун потужністю 157 к.с. і обертовим моментом 250 Нм, що слугує приводом для генератора. Генератор, своєю чергою, живить тягову літій-іонну батарею місткістю 2,1 кВт·год або подає струм безпосередньо до двох електродвигунів сумарною потужністю 330 кВт при інтенсивних навантаженнях. Таке рішення дозволяє мінімізувати витрати пального, середній розхід якого, згідно з даними NISSAN складає 5,2 л на 100 км. Для експлуатації у містах Qashqai e-POWER може стати економним варіантом, забезпечуючи близько 1000 км пробігу на повному баку. Однак з екологічної точки зору, як «чистий» електромобіль, кросовер здатний подолати лише 4...5 км, а підзарядка від зовнішнього джерела для нього не передбачена [18]. Крім того, на високих швидкостях чи під час далеких поїздок витрати пального зростають на 20%, оскільки двигун змушений працювати під більшим навантаженням майже без зупинки, щоб якомога швидше зарядити акумулятор.

Неофіційними дилерами пропонується українським споживачам під замовлення весь модельний ряд послідовних гібридів китайської компанії Li-AUTO – від L6 до L9, яка вважається лідером інноваційного підходу до конструкції подібних транспортних засобів у КНР. Так, кросовер Li L7 тах довжиною 5,05 метри має запас ходу на електротязі 210 км, а загальний – 1100 км, зокрема завдяки 65-літровому бензобаку [19]. Силова установка складається з бензинового двигуна об'ємом 1,5 л. потужністю 154 к.с., генератора, двох електродвигунів сумарною потужністю 330 кВт і батареї ємністю 42,8 кВт·год, яку можна заряджати від зовнішнього джерела.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Кількість автомобілів, обладнаних електричною силовою установкою на вітчизняних вулицях росте, у тому числі, за рахунок «нульового» розмитнення. Однак воно стосується лише «чистих» електромобілів, тоді як гібриди і надалі залишаються поза увагою держави. Ситуація може змінитися з 2025 року, коли будуть скасовані фіскальні пільги на авто BEV, і розміри митних платежів фактично зрівняються для електромобілів і гібридів EREV.

Електромобілі зі збільшеним запасом ходу можуть стати в Україні популярнішими за «чисті» електромобілі завдяки можливості «заправлятися» двома видами пального. Ця технологія забезпечує водіям впевненість під час далеких подорожей, особливо у місцях, де відсутні зарядні станції. Водночас виникає питання: чи обиратимуть власники EREV швидку заправку бензином замість тривалішого заряджання батареї, враховуючи той факт, що екологічні аспекти не вважаються пріоритетом серед більшості українських водіїв. Подібних досліджень немає не лише в Україні, але й за кордоном.

ВИСНОВКИ

Держава, попри військовий стан, продовжує розвиватись технологічно і екологічно у руслі світових трендів. Статистика останніх років дозволяє прогнозувати подальше зростання ринку автомобілів-гібридів в Україні. Зниження вартості батарей, збільшення запасу ходу та розвиток інфраструктури зарядних станцій сприяють цьому процесу. Однак сподіватися на надання субсидій чи пільгових кредитів на придбання гібридного автомобіля залежно від виду силового агрегату найближчим часом не варто. Уряд країни змушений вирішувати набагато важливіші завдання. Зрештою всебічну кількарічну підтримку стимулювання купівлі BEV, у тому числі, під час війни можна вважати більш ніж достатньою.

Сьогодні гібридні автомобілі виступають в ролі проміжної ланки на шляху до повної електрифікації транспорту. Вони дозволяють споживачам «безболісно» пересідати на екологічніші види транспорту без відчуття дискомфорту через обмежений запас ходу електромобілів. Проте масове поширення таких транспортних засобів в Україні – це питання не найближчих років, зважаючи на той факт, що їхня кількість нині становить лише 1,0% усього вітчизняного парку легковиків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. У 2024 році глобальний ринок електромобілів зріс до рекордного рівня. URL: <https://minfin.com.ua/ua/2025/01/15/143524897>.
2. Володимир Скрипін. Tesla vs BYD. Топ-10 найбільших виробників електромобілів у 2023 році [світовий рейтинг]. URL: <https://itc.ua/ua/articles/tesla-vs-byd-top-najbilshyh-vyrobnikov-elektromobiliv>.
3. Global EV Outlook 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
4. Гібридні авто очолили зростання авторинку ЄС у 2024 році. URL: <https://autoporady.com/gibrydni-avto-ocholyly-zrostannya-avtorynku-yes-u-2024-roczii>.
5. Кишун Володимир, Зубенко Віталій. Автомобілі-гібриди у контексті українського законодавства. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем* : матеріали тез V Всеукраїнської науково-технічної інтернетконференції 25–27 жовтня 2023 р. [Електронне видання]. Рівне: НУБГП, 2023. С. 154–156.
6. Електромобілі з розширеним запасом ходу: майбутній хіт продажів чи тупикова гілка? URL: <https://ionity.ua/elektromobili-z-rozshyrenym-zapasom-hodu-hit-prodazhiv-chy-tupykova-gilka/>.
7. Митний тариф України (групи 50-97). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697%D0%B1-20#n1047>.
8. Кишун В. А., Павлюк В. І., Зубенко В. А. Хронологія формування українського ринку електромобілів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, – 2024. №1 (22). – С. 182–193. DOI 10.36910/automash.v1i22.1359.
9. Олексій Астапов. Рекорд продажу гібридних автомобілів в Україні у 2024 році: топ-3 моделей. URL: <https://avtosota.com/51122-rekord-prodazhu-gibrydnyh-avtomobiliv-v-ukrayini-u-2024-roczii-top-3-modelej.html>.
10. Податковий кодекс України. Стаття 215. URL: Підакцизні товари та ставки податку: https://kodeksy.com.ua/podatkovij_kodeks_ukraini/statja-215.htm.
11. Оприлюднені переліг пільг для електромобілів, які діють у різних країнах Європи. URL: <https://ua-electro.com/oprilyudneno-perelig-pilg-dlya-elektromobiliv-yaki-diyut-u-riznix-kraih-eyevropi/>.
12. На що звертати увагу під час купівлі гібридної автівки з пробігом. URL: <https://sto.ms/ua/nachto-obrashhat-vnimanie-pri-pokupke-gibridnogo-avtomobiliv-s-probegom-hev>.
13. Електромобілі на українському ринку вперше випередили гібриди. URL: <https://autoconsulting.ua/article.php?sid=55567>.
14. Експерти назвали найпопулярніші моделі авто у 2024 році. URL: <https://enovosty.com/uk/news-ukr/news-auto-ukr/full/eksperti-nazvali-najpopulyarnishi-modeli-avto-u-2024-roci>.
15. У 2024 році автопарк України поповнили понад 222,1 тис. вживаних легковиків. URL: <https://ukrautoprom.com.ua/postachalnyk-tesla-panasonic-energy-czil-%e2%84%96-1-dlya-ssha-vyklyuchyty-kytaj-z-lancyuzhka-postavok-akkumulyatoriv>.
16. Hyundai Motor представляє нову стратегію «Hyundai Way» та окреслює середньо- та довгострокові цілі на CEO Дні Інвестора 2024 року. URL: <https://hyundai.aelita.ua/node/6617>.
17. Nataliya Kovalchuk. Volkswagen вдало обрав бренд: новий Scout користується шаленим попитом. URL: <https://ampercar.com/volkswagen-vdalo-obrav-brend-novyj-scout-korystuyetsya-shalenympopytom>.
18. Nissan Qashqai e-Power 2025 – вибір майбутнього? URL: <https://autodnk.com/news/qashqai-e-power/>.
19. Li L7 2024 Max. URL: <https://electro-mobility.com.ua/listing/li-l7-max/>.

REFERENCES

1. U 2024 rotsi hlobal'nyy rynok elektromobiliv zris do rekordnoho rivnya. URL: <https://minfin.com.ua/ua/2025/01/15/143524897>.

2. Volodymyr Skrypin. Tesla vs BYD. Top-10 naybil'shykh vyrobnykiv elektromobiliv u 2023 rotsi [svitovyy reytnh]. URL: <https://itc.ua/ua/articles/tesla-vs-byd-top-najbilshyh-vyrobnykiv-elektromobiliv>.
3. Global EV Outlook 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
4. Hibrydni avto ocholyly zrostantnya avtorynku YES u 2024 rotsi. URL: <https://autoporady.com/gibrydni-avto-ocholyly-zrostantnya-avtorynku-yes-u-2024-rotsi/>.
5. Kyshchun Volodymyr, Zubenko Vitaliy. Avtomobili-hibrydy u konteksti ukrayins'koho zakonodavstva. Innovatsiyni tekhnolohiyi rozvytku mashynobuduvannya ta efektyvnoho funktsionuvannya transportnykh system : materialy tez V Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi internetkonferentsiyi 25–27 zhovtnya 2023 r. [Elektronne vydannya]. Rivne: NUVHP, 2023. S. 154–156.
6. Elektromobili z rozshyrenym zapasom khodu: maybutniy khit prodazhiv chy tupykova hilka? URL: <https://ionity.ua/elektromobili-z-rozshyrenym-zapasom-hodu-hit-prodazhiv-chy-tupykova-gilka/>.
7. Mytnyy taryf Ukrayiny (hrupy 50-97). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697%D0%B1-20#n1047>.
8. Kyshchun V. A., Pavlyuk V. I., Zubenko V. A. Khronolohiya formuvannya ukrayins'koho rynku elektromobiliv. Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyy zhurnal. – Luts'k: LNTU, – 2024. №1 (22). – S. 182–193. DOI 10.36910/automash.v1i22.1359.
9. Oleksiy Astapov. Rekord prodazhu hibrydnykh avtomobiliv v Ukrayini u 2024 rotsi: top-3 modeley. URL: <https://avtosota.com/51122-rekord-prodazhu-gibrydnyh-avtomobiliv-v-ukrayini-u-2024-rotsi-top-3-modelej.html>.
10. Podatkovyy kodeks Ukrayiny. Statya 215. URL: Pidaktsyzni tovary ta stavky podatku. https://kodeksy.com.ua/podatkovij_kodeks_ukraini/statja-215.htm.
11. Oprilyudneni perelih pil'h dlya elektromobiliv, yaki diyut' u riznykh krayinakh Yevropy. URL: <https://ua-electro.com/oprilyudneno-perelig-pilg-dlya-elektromobiliv-yaki-diyut-u-riznix-kra%d1%97nax-yevropi/>.
12. Na shcho zvertaty uvahu pid chas kupivli hibrydnoyi avtivky z probihom. URL: <https://sto.ms/ua/na-cho-obra-shhat-vnimanie-pri-pokupke-gibridnogo-avtomobilya-s-probegom-hev>.
13. Elektromobili na ukrayins'komu rynku vpershe vyperedily hibrydy. URL: <https://autoconsulting.ua/article.php?sid=55567>.
14. Eksperty nazvaly naypopulyarnishi modeli avto u 2024 rotsi. URL: <https://enovosty.com/uk/news-ukr/news-auto-ukr/full/eksperti-nazvali-najpopulyarnishi-modeli-avto-u-2024-roci>.
15. U 2024 rotsi avtopark Ukrayiny popovnyly ponad 222,1 tys. vzhyvanykh lehkovykiv. URL: <https://ukrautoprom.com.ua/postachalnyk-tesla-panasonic-energy-czil-%e2%84%96-1-dlya-ssha-vyklyuchyty-kytaj-z-lanczyuzhka-postavok-akkumulyatoriv>.
16. Hyundai Motor predstavlyaye novu stratehiyu «Hyundai Way» ta okreslyuye seredn'o- ta dovhostrokovi tsili na CEO Dni Investora 2024 roku. URL: <https://hyundai.aelita.ua/node/6617>.
17. Nataliya Kovalchuk. Volkswagen vdalo obrav brend: novyy Scout korystuyet'sya shalenym popytom. URL: <https://ampercar.com/volkswagen-vdalo-obrav-brend-novyj-scout-korystuyetsya-shalenym-popytom>.
18. Nissan Qashqai e-Power 2025 – vvybir maybutn'oho? URL: <https://autodnk.com/news/qashqai-e-power/>.
19. Li L7 2024 Max. URL: <https://electro-mobility.com.ua/listing/li-l7-max/>.

V. Kyshchun. The Ukrainian Hybrid Car Market

The growing number of vehicles equipped with electric powertrains is part of the global trend toward environmentally friendly transportation, as such vehicles are considered one of the most effective ways to reduce environmental pollution.

The transition of Ukraine's vehicle fleet to electric and hybrid cars is one of the state's pressing tasks, given that electricity is rightly regarded as a readily available alternative energy source. The more such vehicles are introduced into the country, the less Ukraine will depend on fuel imports.

Today, the media and other sources of information offer the following designations for vehicles equipped with different electric propulsion systems: NEV, EV, BEV, HEV, PHEV, MHEV, FHEV, EREV and FCEV. The paper explains these abbreviations and provides brief characteristics of the cars.

The classification of an electric vehicle as a particular type is reflected in the Customs Code of Ukraine by assigning it a UKTZED (Ukrainian Classification of Goods for Foreign Economic Activity) code. This, accordingly, affects the number of payments when importing vehicles into the customs territory of Ukraine, in particular, the code 8703 80 10 10 is used for BEVs and the code 8703 80 10 90 for EREVs.

Fiscal factors have a significant impact on the domestic passenger car market, as demonstrated by the analysis of the last decade.

As the popularity of hybrid cars grows, countries with a high level of motorisation are taking measures to increase their number, including through government incentives. This is rarely seen in Ukrainian legislation, while the domestic fleet of hybrid cars has more than tripled over the past 5 years: from 29.2 thousand units in 2020 to 98.1 thousand in 2024.

Ukrainian consumers' preferences for car powertrains have changed significantly. In 2024, electric vehicles and hybrids, including EREVs, accounted for 33% of the new car market, displacing passenger cars with petrol and diesel engines. However, given the current interest of global automakers in expanding their model range with vehicles with an extended range, as well as changes to the Customs Code of Ukraine, this type of electric vehicle may grow in popularity in the domestic market by the end of the decade.

Keywords: electric vehicle, hybrid car, EREV, hybrid market and fleet, statistics, Customs Code, excise duty.

КИЩУН Володимир Андрійович, кандидат економічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: kyshchun52@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0003-4019-8034>.

Volodymyr KYSHCHUN, PhD. in Economic, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: kyshchun52@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0003-4019-8034>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1726

УДК 658.5.009.12:338.436
UDK 658.5.009.12:338.436

Козак С.В., Хітров І.О.

*Національний університет водного господарства та природокористування***БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ
ПЕРСОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ШЛЯХОМ ВКЛЮЧЕННЯ ДО
ЄДИНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ**

Україна, співпрацюючи з міжнародними проектами за фінансування Світового банку, активно провадить політику, що спрямована на інтеграцію до світового економічного простору. Даний політичний курс створює економічні та політичні передумови, що вимагають поглиблення міжнародних зв'язків та зростання обсягів торгівлі, що в кінцевому результаті призводить до збільшення інтенсивності пасажиро – і вантажопотоків, що сприяє розвитку України в транспортній галузі. Прагнення України інтегруватися до світового економічного простору вимагає забезпечення ефективного функціонування єдиної транспортної системи держави, чіткої юридичної визначеності і ясності правового регулювання транспортної сфери, особливо в частині забезпечення безпеки дорожнього руху. Поряд із цим на сьогодні існує низка проблем правового характеру, про що йдеться у даному дослідженні. Транспорт є проміжною ланкою між створенням продукції виробником та її доставкою до споживача, налагодженням зв'язків виробника з різними галузями господарства для встановлення попиту на ту чи іншу продукцію, переміщенням вантажів та здійсненням пасажирських перевезень. Роль транспортної системи у розрізі економічного розвитку держави можна визначити як ключову. Без належного стану розвитку в Україні транспортної системи, ефективного функціонування усіх видів транспорту, надання якісних транспортних послуг стабілізація та позитивна динаміка у сфері економіки неможлива.

Ключові слова: безпека транспортної діяльності, ефективність, електричний транспорт, єдина транспортна система України

ВСТУП

Проаналізувавши чинне законодавство України з питань безпеки транспортної діяльності, ми виявили наявну правову прогалину, а саме повну відсутність правових норм, якими мають врегульовуватися суспільні відносини у сфері безпеки дорожнього руху, зокрема в частині правил використання учасниками дорожнього руху персонального транспорту з електричним приводом.

Беручи до уваги зростаючу популярність в Україні та світі транспортних засобів пересування з електроприводом, ми поставили завдання дослідити, у який спосіб в Україні регулюється (і чи регулюється взагалі) організація безпеки транспортної діяльності, учасники якого використовують засоби персонального електротранспорту. З цієї метою досліджено зарубіжний досвід забезпечення безпеки дорожнього руху та проаналізовано українські реалії з означеного питання.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Економічним проблемам розвитку транспортної галузі присвятили свої дослідження такі українські та зарубіжні вчені, як О.П. Голиков, В.Г. Шинкаренко А.І. Абрамов, А.В. Вельможин, А.І. Воркут, Б.Л. Геронімус, Є.А. Жуков, В.Н. Іванов, В.Є. Канарчук, Л.В. Канторович та інші. Науковці всебічно вивчали питання розвитку транспортного комплексу, давали рекомендації й пропонували шляхи забезпечення ефективного функціонування цієї важливої сфери народно-господарського комплексу країни.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є дослідження транспортної діяльності та аналіз ефективності персонального автомобільного транспорту, шляхом включення до єдиної транспортної системи України

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розвиток транспортної системи в економіці будь-якої держави безпосередньо впливає на рівень економічного зростання. Транспорт є проміжною ланкою між створенням продукції виробником та її доставкою до споживача, налагодженням зв'язків виробника з різними галузями господарства для встановлення попиту на ту чи іншу продукцію, переміщенням вантажів та здійсненням пасажирських перевезень. Роль транспортної системи у розрізі економічного розвитку держави можна визначити як ключову. Без належного стану розвитку в Україні транспортної системи, ефективного функціонування усіх видів транспорту, надання якісних транспортних послуг стабілізація та позитивна динаміка у сфері економіки неможлива. Ефективне функціонування в Україні транспортної системи є також вагомим умовою для розвитку зовнішньоекономічних відносин, забезпечення достатнього життєвого рівня громадян тощо.

Сучасна політика держави спрямована на створення сприятливих умов у сфері економіки задля входу українських транспортних мереж до єдиної транспортної системи та вступу України у світове співтовариство шляхом інтеграції в європейську та світову економіку.

Можливість пересування за допомогою транспорту є однією з важливих потреб людини, що у сучасному світі дає їй змогу бути повноцінним членом суспільства. Задовольнятися ця потреба може різними способами: за допомогою громадського та приватного транспорту, засобів мікромобільності (велосипедів, самокатів та відповідних електричних аналогів). Транспорт (від латинського *transporto* – «переміщувати») – найважливіша ланка у сфері економічних відносин, одна із провідних галузей матеріального виробництва. Він бере участь у створенні продукції та доставці її споживачам, здійснює зв'язок між виробництвом та споживанням, між різними галузями господарства, між країнами та регіонами.

Хоча ця галузь господарства не створює жодних матеріальних цінностей, розвиток транспорту розглядається як одне зі стратегічних завдань у будь-якій розвинутій державі. Транспорт є необхідною умовою функціонування господарства, оскільки забезпечує вкрай важливі зв'язки між окремими підприємствами, галузями та регіонами. Тим самим транспорт об'єднує територію окремої країни в єдине господарство, а національні господарства – в єдине світове господарство. Невипадково транспорт називають «кровоносною системою економіки».

Значення транспорту для держави з розгалуженою інфраструктурою є досить вагомим аспектом. Він відіграє важливу економічну, оборонну, соціально-політичну та культурну роль. Транспорт є важливою складовою частиною ринкової інфраструктури, бо створює умови для формування загальнодержавного й місцевих ринків.

Наукові джерела дають різні визначення транспорту. Одна група вчених визначає транспорт як єдину систему залізничних, авто-мобільних, річних, морських, трубопровідних й повітряних шляхів сполучення. Всі види транспорту тісно пов'язані один з одним й взаємодіють під час виконання перевезень⁷.

Інші дослідники притримуються більш об'ємного трактування, де «транспорт» розглядається не лише як сукупність засобів перевезення й шляхів сполучення, а й також як засіб керування та зв'язку, різних технічних пристроїв, механізмів і споруджень, що забезпечують процес перевезення.

Застосовуючи різні підходи для встановлення ролі транспорту, варто звернути увагу на погляди К. Маркса, який стверджував, що транспортна промисловість представляє самостійну галузь виробництва, а тому й особливу сферу додавання виробничого капіталу. З іншого боку, вона відрізняється тим, що представляє продовження виробничого процесу в процесі обігу й для процесу обігу⁶.

Варто звернути увагу на науковий погляд А.М. Маркової, яка зазначає, що транспорт обслуговує потребу в перевезеннях всіх галузей економіки, як сфери матеріального виробництва, так і не-матеріальної сфери. Транспорт забезпечує постійний зв'язок міжгосподарськими одиницями, який є необхідним для розвитку виробництва, обміну, забезпечення різних потреб економіки й населення. Транспорт забезпечує перевезення вантажів, переносить на них свою вартість і утворює нову вартість. З огляду на це виробничі та невиробничі потреби галузей економіки і населення у перевезеннях надзвичайно важливі. Транспорт має три елементи, які характерні для будь-якої галузі матеріального виробництва: (а) предмети праці – об'єкти перевезення (вантажі, пасажери); (б) засоби праці – транспортні засоби; (в) характеризується як доцільна діяльність людей – працівів.

Розглянувши численні погляди, що зустрічаються в різних джерелах, можна прийти до висновку, що значення транспорту необхідно розглядати разом з його соціально-економічною функцією, яку він відіграє у розвитку держави. Дана функція проявляється у можливості реалізації обміну матеріальних та духовних потреб між населеними пунктами як у межах області, так і між областями, що сприяє консолідації єдиної країни.

Резюмуючи вищевикладене, варто підкреслити, що цілкове та якісне задоволення потреб держави в транспортних перевезеннях можливе лише у випадку, коли всі транспортні засоби будуть функціонувати та прогресувати у взаємозв'язку. Результат такої єдності створює можливість задовольнити потреби населення та ведення економічної діяльності не лише в перевезеннях, а й в інших транспортних послугах. Науково-технічний прогрес сприяє створенню нових та вдосконаленню вже наявних видів транспорту, що призводить до конкуренції окремих видів транспортних засобів. Варто зазначити, що на сьогодні в Україні з'являються та набувають великої популярності нові види транспорту для персонального користування, які ще не включені до єдиної транспортної системи України. Окрім самокатів – як електричних, так і звичайних – сюди зараховують

понад 12 найменувань гаджетів, зокрема сегвеї, моноколеса, ролики та електроролики, гіроскутери тощо. Кількість поїздок, що здійснюються такими транспортними засобами, збільшується щоденно. Відсутність цих видів транспортних засобів у Правилах дорожнього руху та стратегіях країни створює правову невизначеність у випадку дорожньо-транспортної пригоди та обмежує можливості їх розвитку. На нашу думку, сприяння розвитку таких видів транспорту повинно вважатися пріоритетним, оскільки вони є екологічно чистими та не створюють заторів у населених пунктах з інтенсивним рухом транспортних засобів та пішоходів. Всі перелічені види транспорту та велосипед об'єднує кілька характеристик: а) вони призначені для персонального використання; б) вони легкі, їх можна перенести у руках. За прикладом країн ЄС пропонується об'єднати ці види транспорту під загальною назвою «персональний транспорт» і додати це визначення у закони України. Закон України «Про транспорт» від 10 листопада 1994 року № 232/94-ВР (далі – Закон України «Про транспорт») дає визначення єдиної транспортної системи України. Так, стаття 21 даного закону встановлює, що єдину транспортну систему України становлять: транспорт загального користування (залізничний, морський, річковий, автомобільний і авіаційний, а також міський електротранспорт, у тому числі метрополітен); промисловий залізничний транспорт; відомчий транспорт; трубопровідний транспорт; шляхи сполучення загального користування.

До складу міського електротранспорту згідно зі статтею 34 Закону України «Про транспорт» входять підприємства міського електротранспорту, що здійснюють перевезення пасажирів, вантажів, багажу, пошти, рухомий склад, трамвайні і тролейбусні лінії, ремонтно-експлуатаційні депо, службові приміщення, фунікулери, канатні дороги, ескалатори, заводи з ремонту рухомого складу і виготовленню запасних частин, споруди енергетичного господарства та зв'язку, промислові, ремонтно-будівельні, торговельні та постачальницькі організації, навчальні заклади, науково-дослідні та проектно-конструкторські установи, заклади охорони здоров'я, відпочинку, фізичної культури і спорту та інші культурно-побутові заклади і підприємства, установи та організації незалежно від форм власності, що забезпечують роботу міського електротранспорту.

Опрацювавши норми Закону України «Про транспорт», Закону України «Про дорожній рух» та постанову Кабінету Міністрів України від 10 жовтня 2001 р. № 1306 «Правила дорожнього руху», варто звернути увагу, що на сьогодні відсутнє визначення на законодавчому рівні поняття персонального транспорту як окремого виду транспорту. Внаслідок цього такий популярний та розповсюджений транспорт не включений в єдину транспортну систему поряд з усіма іншими видами транспорту, що перелічені в ст. 21 Закону України «Про транспорт». Станом на 23.07.2021 р. ст. 14 Закону України «Про дорожній рух» чітко визначила, що до учасників дорожнього руху віднесені лише водії та пасажирів транспортних засобів, пішоходи, велосипедисти, погоничі тварин. Надавши такий вичерпний перелік законодавець, на нашу думку, допустив юридичну помилку, оскільки осіб, які пересуваються персональним електричним транспортом, не було віднесено ні до жодної з категорій учасників дорожнього руху. Оскільки їх не винесено в окрему категорію, це тягне за собою негативні наслідки у вигляді суперечностей та неоднозначного трактування правозастосовувачем норм законодавства у сфері безпеки дорожнього руху.

У 2020 році фонд Velo friends провів інтернет-опитування для користувачів двоколісного немоторизованого та мікромобільного транспорту. Опрацьовані результати показали достатньо велику популярність засобів пересування з електроприводом. 3688 опитаних респондентів 47% зазначили, що поєднують поїздки на двоколісному транспорті з використанням автомобільного транспорту, 26,3% відмітили, що користуються прокатним автомобілем або таксі, 26,0% учасників опитування їздять на електросамокаті, 3,7% осіб їздять на електровелосипеді, 5,3% опитаних використовують моноколесо.

Проаналізувавши чинне законодавство в сфері безпеки дорожнього руху, ми виявили наявну правову прогалину, тобто повну відсутність правових норм, якими мають врегульовуватися суспільні відносини у сфері безпеки дорожнього руху. Беручи до уваги популярність засобів пересування з електроприводом в Україні, ми дослідили зарубіжний досвід забезпечення безпеки дорожнього руху.

Транспорт для персонального користування в більшості європейських країнах прирівнюється до велосипедів, тобто користувачі персонального електротранспорту повинні рухатися велосипедними доріжками, які відокремлені бордюром та позначені спеціальним наказовим знаком «Доріжка для велосипедистів». Таким чином, учасники дорожнього руху таких зарубіжних країн користуються більш високим рівнем безпеки на дорозі та захищені на законодавчому рівні як повноцінні учасники дорожнього руху з обов'язком дотримуватися та не порушувати вимог правил дорожнього руху. З огляду на вищевикладене можна підсумувати, що кваліфікація поліцейськими дорожньо-

транспортних пригод не викликає жодних складнощів. Це діаметрально відрізняється від ситуації в Україні, де поліція на власний розсуд кваліфікує користувачів персонального електротранспорту, які є причетними до ДТП, іноді прирівнюючи їх до пішоходів, іноді – до транспортних засобів, хоча вони, згідно із чинним законодавством, не відносяться до жодної з них.

Використання персонального електротранспорту у Грузії, як і в Україні, окремим законом не регулюється, а водії такого виду транспорту так само прирівняні до пішоходів. Проте тут діє обмеження швидкості – до 20 км/год.

Правила дорожнього руху Казахстану визначають, що велосипеди, мопеди і прирівняний до них електроскутер повинні рухатися велосипедною смугою або велосипедною доріжкою, а в разі їх відсутності – правим краєм проїжджої частини. Власники сігвеїв, моноколес, гіроскутерів прирівняні до пішоходів¹¹.

Польща 01 вересня 2021 року врегулювала рух персонального електротранспорту та встановила суворе покарання за порушення передбачених законом правил. Вартий уваги приклад виїзду на тротуар або в пішохідну зону велосипедистами та користувачами дрібним електротранспортом, які зобов'язані рухатися зі швидкістю, близькою до швидкості руху пішоходів, та надавати їм пріоритет. На велосипедних доріжках їздити на самокатах та іншому електротранспорті дозволено не швидше 20 км/год, при цьому використання телефону або перевезення іншої людини, тварини чи багажу суворо заборонено чинними правилами в даній країні¹¹. З червня 2021 року в Німеччині офіційно дозволено користуватися електроскутерами. Водити електросамокати можна з 14 років. Спеціальні водійські права не потрібні. Носіння шолома не обов'язкове, але настійно рекомендоване. Їздити на самокатах з електроприводом можна тільки велодоріжками, а якщо їх немає – проїжджою частиною. Що стосується сігвеїв, то ними в Німеччині користуються навіть поліцейські. Їздити на такому транспорті в ФРН можна з 15 років і за наявності, як мінімум, прав на водіння мопеда¹¹.

У Нідерландах, як велосипедній країні, заборонені будь-які електричні пристрої. Тут електросамокати прирівняні до мопедів, на які треба отримувати права. Основні принципи щодо врегулювання руху е-самокатів у світі – обмеження швидкості (20–25 км/год) і потужності – від 250 Вт в Швеції до 1 кВт в Естонії. Максимально дозволена швидкість руху – 20–25 км/год. Якщо пристрій технічно може їхати понад 20–25 км/год, то він уже не потрапляє у цю категорію і прирівнюється до мопеда, на керування яким потрібно мати права.

Рух тротуарами заборонений майже скрізь – у Франції, Німеччині, Іспанії (за винятком кількох міст), Австрії, Швеції тощо. Рекомендовано рухатися велодоріжкою, а якщо її немає – краєм проїжджої частини [8].

Щодо вікових обмежень використання електротранспорту, то вони в кожній країні можуть бути різні. Шоломи у жодній з країн не є обов'язковими, але рекомендованими⁹.

Також у більшості країн прямо прописано, що цей електричний пристрій для пересування може використовувати лише одна людина.

Підсумовуючи вищевикладене, можна зробити висновок, що у чинному законодавстві України існує юридична прогалина, оскільки для користувачів такого виду транспорту, який активно використовується великою кількістю людей, не передбачено жодної відповідальності у разі порушення ними законодавства у сфері безпеки дорожнього руху. Незважаючи на перераховане вище, до сьогодні персональний, і, зокрема, велосипедний транспорт, не визнано невід'ємною частиною транспортної системи України відповідно до статті 21 Закону України «Про транспорт». І що найголовніше, питання безпеки велосипедистів та інших користувачів персонального транспорту, організація руху велосипедного та інших видів персонального транспорту не віднесені до повноважень жодного центрального органу виконавчої влади.

В Україні рівень смертності на дорозі та отримання тілесних ушкоджень різного ступеню тяжкості учасниками дорожнього руху внаслідок дорожньо-транспортних пригод є надзвичайно високим порівняно з іншими європейськими державами, а рівень організації безпеки дорожнього руху залишається вкрай низьким, про що у своїх звітах неодноразово наголошували експерти ВООЗ, Світового банку та інших міжнародних інституцій. За оцінкою Світового банку, щорічні втрати в результаті дорожньо-транспортних пригод в Україні становлять близько 4–5 млрд. доларів США. Так, у 2016 році на українських дорогах загинуло майже 3,4 тис. осіб, 33,6 тис. були травмовані¹³. У 2019 році в Україні зареєстровано 160 675 дорожньо-транспортних пригод, із них 26052 – із загиблими та/або травмованими особами (загинуло 3454 особи і травмувалося 32736 осіб). Понад 33 відсотки загиблих та/або травмованих у дорожньо-транспортних пригодах є пішоходами (1261 особа

загинула і 8005 осіб травмовані). На дорогах України загинуло 164 дитини та травмовано 4435 дітей віком до 18 років.

За словами першого заступника начальника Департаменту патрульної поліції Олексія Білошицького, протягом 2020 року в Україні сталося 168 107 ДТП. З них 26 140 ДТП – з травмованими, в яких загинула 3541 людина та 31974 людини дістали травм.

За фактичними даними довідкового сайту WorldLifeExpectancy, на якому розміщені дані щодо аварійності та наслідків дорожньо-транспортних пригод, Україна посідає шосте місце в Європі за смертністю у ДТП. Попереду нас щодо кількості загиблих Росія, Албанія, Литва, Білорусь та Молдова. Так, у середньому в державах – членах ЄС на 100 тис. жителів припадає 5 відсотків загиблих у дорожньо-транспортних пригодах, тоді як в Україні такий показник становить (за даними 2019 року) 8,22 відсотка осіб, або 9 осіб на 100 тисяч населення¹³.

Згідно зі Стратегією підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року, затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2020 р. № 1360-р, одними з основних напрямів реалізації цієї Стратегії в частині державного управління у сфері забезпечення безпеки дорожнього руху є:

1) забезпечення дотримання пріоритетності інтересів учасників дорожнього руху під час розроблення заходів із підвищення безпеки дорожнього руху відповідно до підходів сталої міської мобільності, а саме врахування їх інтересів у такій послідовності: пішоходи (насамперед маломобільні групи населення), велосипедисти та інші незахищені учасники дорожнього руху, громадський транспорт та транспорт екстрених і комунальних служб, вантажний автотранспорт, легковий автотранспорт приватних осіб та організацій; проведення аналізу та вдосконалення законодавства з питань безпеки дорожнього руху з метою забезпечення його відповідності найкращим законодавчим стандартам, що діють у країнах Європи з найбезпечнішими дорожньо-транспортними системами, у тому числі в частині посилення відповідальності громадян та посадових осіб за вчинення правопорушень у сфері забезпечення безпеки дорожнього руху, правового врегулювання використання персонального легкого електротранспорту (сегвеї, моноколеса (самобалансуючі одноколісні пристрої), електросамокати тощо) на вулично-дорожній мережі, попередження дитячого дорожньо-транспортного травматизму.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таким чином, глобальною тенденцією розвитку світової економіки на сучасному етапі стає проблематика вдосконалення ефективності транспортної логістики, при застосуванні цифровізації та інформаційних технологій. Вдосконалення ефективності транспортної логістики дозволяє виділити основні елементи ефективності транспортного процесу. Забезпечення ефективності транспорту та завдяки вдосконаленню ефективності транспортної логістики, при застосуванні цифровізації та інформаційних технологій, допомагає сформулювати необхідний потенціал та передбачає вирішення основних задач сьогодення.

ВИСНОВКИ

Вважаємо, що успішний досвід різних іноземних країн може бути консолідований та застосований в українському законодавстві, а в подальшому – впроваджений у наявну систему забезпечення безпеки дорожнього руху в Україні.

Констатовано, що досвід різних зарубіжних країн має бути більш детально проаналізований та модернізований з урахуванням сучасних українських реалій, а надалі – інтегрований у чинну систему забезпечення безпеки дорожнього руху в Україні.

Із метою вдосконалення чинного законодавства у сфері безпеки дорожнього руху та зниження смертельних наслідків і випадків травмування учасників дорожнього руху на дорогах України нами пропонується узгодити норми чинного законодавства з вимогами сучасності.

По-перше, на нашу думку, необхідно внести зміни до Закону України «Про транспорт» шляхом включення електровелосипедів, самокатів, електросамокатів, сігвеїв, гіробордів, самобалансуючих електричних одноколісних велосипедів (моноколеса), електроскутерів, гіроскутерів, електроскейтів, моноциклів, гіророліків до персонального транспорту. Таке рішення дасть можливість популяризувати цей екологічний спосіб пересування та забезпечити безпеку дорожнього руху для його користувачів. Увести вимогу щодо здійснення обов'язкового аналізу причин аварій та дорожньо-транспортних пригод та розроблення профілактичних заходів щодо їх запобігання, а також встановити контроль за їх виконанням. По-друге, внести зміни до статті Кодексу України про адміністративну відповідальність (далі – КУпАП). Зокрема, ми пропонуємо частину 2 статті 127 КУпАП в редакції від 08.08.2021, яка визначає відповідальність за порушення правил дорожнього

руху особами, які керують велосипедами, гужовим транспортом, і погоничами тварин, доповнити визначенням персональним електротранспортом.

Дані доповнення до вищезазначеної статті позитивно впливатимуть на підвищення рівня безпеки учасників дорожнього руху та зроблять можливим ведення обліку та проведення аналізу причин аварій, дорожньо-транспортних пригод на автомобільному, міському електричному, залізничному та персональному транспорті¹⁵. На основі статистичних даних центральний орган виконавчої влади, що забезпечує реалізацію державної політики з питань безпеки на наземному транспорті, отримає повноваження на проведення технічного розслідування дорожньо-транспортних пригод, а на основі отриманих результатів буде зобов'язаний розробляти профілактичні заходи щодо запобігання виникненню катастроф, аварій, дорожньо-транспортних пригод на автомобільному, міському електричному, залізничному та персональному транспорті та матиме право здійснювати контроль за їх виконанням.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Устенко М. О. Актуальність формування транспортно-логістичних систем в умовах євроінтеграції / М. О. Устенко // Вісн екон. трансп. і пром-сті. — 2015. — № 49. — С. 207–210.
2. Бойко О. В. Ринок транспортних послуг: основи методології розвитку: монограф. / О. В. Бойко. — К. : Кондор, 2014. — 494 с.
3. Брагінський В. В. Розвиток транспортно-логістичної системи як форма реалізації транзитного потенціалу України / В. В. Брагінський // Державне управління: теорія і практика. — 2011 — № 2 [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.academy.gov.ua/ej/ej14/index.htm>.
4. Іртишева І. О. Структура транспортно-логістичної системи України / І. О. Іртишева, С. М. Мінакова, О. А. Христенко // Глобальні та національні проблеми економіки. — 201 — № 4. — С. 146–149.
5. Михайличенко К. М. Відновлення транзитного потенціалу як чинник підвищення конкурентоспроможності України / К. Михайличенко // Стратегічні пріоритети. — 2015. — № 4. — С. 59–65.
6. Попова Н. В. Транспортно-логістична система: дефініція та складові / Н. В. Попова // Бізнес Інформ. — 2016. — № 1. — С. 169–174.
7. Соколова О. Є. Теоретико-методологічні основи формування транспортно-логістичної системи України [Електронний ресурс] / О. Є. Соколова. — Режим доступу : <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/PPEI/article/view/182/173>.
8. Чернявська Т. А. Стратегічні напрями розвитку транспортно-комунікативної системи України в контексті забезпечення національної безпеки і самодостатності / Т. Чернявська // Екон. вісн. Нац. гірн. ун-ту. — 2015. — № 3. — С. 68–76.
9. Зайцева І. Ю. Фінансово-правові аспекти процесу інтеграції України до Транс-Європейської транспортної мережі ТЕМ-Т / І. Ю. Зайцева // Вісн. екон. трансп. і пром-сті. — 2014. — № 46. — С. 223–227.
10. Садловська І. П. Розвиток національної транспортної мережі України та її інтеграція до пріоритетних транспортних мереж ЄС / І. Садловська // Зб. наук пр. Держ. екон.-техн. ун-ту трансп. — 2015. — № 31. — С. 16–26.
11. Ткач О. В. Формування єдиної логістичної системи: важлива складова євро-інтеграційних процесів / О. В. Ткач, І. А. Волощук // Наук. вісн. Херсон. держ. ун-ту. — 2014. — № 9. — С. 208–212. — (Серія «Економіка»).
12. Співробітництво Україна – ЄС в сфері транспорту // Офіційний сайт Представництва України при Європейському Союзі та Європейському Співтоваристві атомної енергії [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://ukraine-eu.mfa.gov.ua/ua/ukraine-eu/sectoral-dialogue/transport>.
13. Міжнародна технічна допомога ЄС у сфері транспорту // Офіційний сайт Міністерства інфраструктури України [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://mtu.gov.ua/content/mizhnarodna-tehnichna-dopomoga-es-u-sferi-transportu.html>.

REFERENCES

1. Ustenko M. O. Aktual'nist' formuvannja transportno-logistychnyh system v umovah jevrointegracij' / M. O. Ustenko // Visn ekon. трансп. і пром-сті. — 2015. — № 49. — С. 207–210.
2. Bojko O. V. Rynok transportnyh poslug: osnovy metodologii' rozvytku : monograf. / O. V. Bojko. — K. : Kondor, 2014. — 494 s.
3. Bragins'kyj V. V. Rozvytok transportno-logistychnoi' systemy jak forma realizacij' tranzytnogo potencialu Ukrai'ny / V. V. Bragins'kyj // Derzhavne upravlinnja: teorija і praktyka. — 2011. — № 2 [Elektronnyj resurs]. — Rezhym dostupu : <http://www.academy.gov.ua/ej/ej14/index.htm>.
4. Irtyshheva I. O. Struktura transportno-logistychnoi' systemy Ukrai'ny / I. O. Irtyshheva, S. M. Minakova, O. A. Hrystenko // Global'ni ta nacional'ni problemy ekonomiky. — 2015. — № 4. — С. 146–149.

5. Myhajlychenko K. M. Vidnovlennja tranzytnogo potencialu jak chynnyk pid- vyshhennja konkurentospromozhnosti Ukrai'ny / K. Myhajlychenko // *Strategichni priorytety*. — 2015. — № 4. — S. 59–65.
6. Popova N. V. Transportno-logistychna systema: definicija ta skladovi / N. V. Popova // *Biznes Inform.* — 2016. — № 1. — S. 169–174.
7. Sokolova O. Je. Teoretyko-metodologichni osnovy formuvannja transportno-logistychnoi'systemy Ukrai'ny [Elektronnyj resurs] / O. Je. Sokolova. — Rezhym dostupu : <http://jrnlnau.edu.ua/index.php/PPEI/article/view/182/173>.
8. Chernjavs'ka T. A. Strategichni naprjamy rozvytku transportno-komunikatyvnoi' systemy Ukrai'ny v konteksti zabezpechennja nacional'noi' bezpeky i samodostatnosti /T. Chernjavs'ka // *Ekon. visn. Nac. girn. un-tu*. — 2015. — № 3. — S. 68–76.
9. Zajceva I. Ju. Finansovo-pravovi aspekty procesu integracii' Ukrai'ny do Trans- Jevropejs'koi' transportnoi' merezhi TEM-T / I. Ju. Zajceva // *Visn. ekon. transp.i prom-sti*. — 2014. — № 46. — S. 223–227.
10. Sadlovs'ka I. P. Rozvytok nacional'noi' transportnoi' merezhi Ukrai'ny ta i'i' integracijado priorytetnyh transportnyh merezh JeS / I. Sadlovs'ka // *Zb. nauk pr. Derzh. ekon.- tehn. un-tu transp.* — 2015. — № 31. — S. 16–26.
11. Tkach O. V. Formuvannja jedynoi' logistychnoi' systemy: vazhlyva skladova jevro- integracijnyh procesiv / O. V. Tkach, I. A. Voloshhuk // *Nauk visn. Herson. derzh. un-tu*. — 2014. — № 9. — S. 208–212. — (Serija «Ekonomika»).
12. Spivrobitnyctvo Ukrai'na – JeS v sferi transportu // Oficijnyj sajт Predstavnytva Ukrai'ny pry Jevropejs'komu Sojuzi ta Jevropejs'komu Spivtovarystvi z atomnoi' energii' [Elektronnyj resurs]. — Rezhym dostupu : <http://ukraine-eu.mfa.gov.ua/ukraine-eu/sectoral-dialogue/transport>.
13. Mizhnarodna tehnicna dopomoga JeS u sferi transportu // Oficijnyj sajт Ministerstva infrastruktury Ukrai'ny [Elektronnyj resurs]. — Rezhym dostupu : <http://mtu.gov.ua/content/mizhnarodna-tehnicna-dopomoga-es-u-sferi-transportu.html>.

S. Kozak, I. Khitrov. Security of transport activities and analysis of the efficiency of personal electric transport through inclusion into the unified transport system of Ukraine

Ukraine, cooperating with international projects financed by the World Bank, is actively pursuing a policy aimed at integration into the global economic space. This political course creates economic and political prerequisites that require deepening international ties and increasing trade volumes, which ultimately leads to an increase in the intensity of passenger and cargo flows, which contributes to the development of Ukraine in the transport sector. Ukraine's aspiration to integrate into the global economic space requires ensuring the effective functioning of the unified transport system of the state, clear legal certainty and clarity of legal regulation of the transport sector, especially in terms of ensuring road safety. Along with this, there are currently a number of legal problems, which are discussed in this study. Transport is an intermediate link between the creation of products by the manufacturer and their delivery to the consumer, establishing relations between the manufacturer and various sectors of the economy to establish demand for a particular product, moving cargo and carrying out passenger transportation. The role of the transport system in the context of the economic development of the state can be defined as key. Without the proper development of the transport system in Ukraine, the effective functioning of all types of transport, and the provision of quality transport services, stabilization and positive dynamics in the economy are impossible.

Keywords: transport safety, efficiency, electric transport, unified transport system of Ukraine

КОЗАК Світлана Володимирівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національний університет водного господарства та природокористування e-mail: svetakoza1971@ukr.net. <http://orcid.org/0009-0006-3204-1861>

ХІТРОВ Ігор Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-2310-1472>.

Svitlana KOZAK, Doctor of Economics, Associate Professor of the departament of transport technologies and technical servise National University of Water Management and Nature Management e-mail svetakoza1971@ukr.net. <http://orcid.org/0009-0006-3204-1861>

Ihor KHITROV, PhD, Associate Professor of the Transport Technology and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-2310-1472>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1727

**ВИБІР МЕТОДУ АПРОКСИМАЦІЇ ШВИДКІСНОЇ ЗОВНІШНЬОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДИЗЕЛЯ**

Стаття присвячена вибору методу апроксимації швидкісних зовнішніх характеристик дизелів, що є важливим етапом математичного моделювання при визначенні показників експлуатаційних властивостей автомобілів.

Проведено аналіз швидкісних зовнішніх характеристик сучасних дизелів з турбонаддувом та електронними системами управління подачею палива та встановлено, що такі двигуни мають область постійного крутного моменту в широкому діапазоні кутових швидкостей колінчастого вала. Це створює додаткові труднощі при їх аналітичному описі та потребує вибору відповідного методу апроксимації.

Розглянуто можливості використання різних методів апроксимації, таких як поліноміальна апроксимація за методом Лагранжа та методом найменших квадратів, а також кусочно-лінійна апроксимація. Встановлено, що поліноміальні методи можуть забезпечити високу точність лише для характеристик з гладкою кривою крутного моменту, яка спочатку зростає, досягає максимуму, а потім спадає. Проте для дизелів із областю постійного крутного моменту вони демонструють значні похибки. Збільшення ступеня поліному покращує точність апроксимації, але, навіть, поліноми 6-го ступеня не дозволяють точно описати область постійного крутного моменту та утворюють на ній локальні екстремуми (вигини).

Показано, що кусочно-лінійна апроксимація дозволяє точно відтворити швидкісну зовнішню характеристику дизеля з областю постійного крутного моменту. Для дизеля Volkswagen CAYD встановлено, що розбивка діапазону кутових швидкостей на п'ять ділянок забезпечує найвищу точність апроксимації. Зменшення кількості ділянок до трьох призводить до деякого зниження точності апроксимації, проте залишається достатньо високою і переважає апроксимацію поліномом 6-го ступеня з використанням методу найменших квадратів.

Таким чином, кусочно-лінійна апроксимація є оптимальним методом для апроксимації швидкісних зовнішніх характеристик дизелів з областю постійного крутного моменту.

Ключові слова: дизель, швидкісна зовнішня характеристика, апроксимація, поліноміальна апроксимація, кусочно-лінійна апроксимація, математичне моделювання.

ВСТУП

При проведенні теоретичних досліджень експлуатаційних властивостей автомобілів, зокрема тягово-швидкісних властивостей та паливної економічності, необхідно мати математичну модель двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Одним із ключових параметрів такої моделі є залежність крутного моменту від кутової швидкості або частоти обертання колінчастого вала, яка визначається на основі швидкісних характеристик двигуна, наприклад, швидкісної зовнішньої характеристики. Точний опис цієї залежності дозволяє прогнозувати поведінку автомобіля в різних режимах роботи та здійснювати подальшу оцінку його експлуатаційних властивостей.

Фізичні процеси, які відбуваються в ДВЗ, є складними для аналітичного опису, а експериментальні дані, отримані в результаті стендових або дорожніх випробувань, часто подані у вигляді дискретних точок на швидкісних характеристиках, що ускладнює подальший аналіз і використання таких даних у математичних розрахунках. Тому, для їхньої обробки необхідно використовувати методи апроксимації, які дозволяють подати залежність крутного моменту від кутової швидкості колінчастого вала ДВЗ у вигляді аналітичної функції.

Апроксимація відіграє важливу роль у математичному моделюванні, адже вона дозволяє не лише узагальнити експериментальні результати, а й забезпечити їхнє зручне використання у розрахунках. Вибір відповідного підходу до апроксимації впливає на точність опису вихідних характеристик, а також на складність подальших обчислень. Саме тому порівняння різних методів апроксимації є важливим завданням, що дозволяє визначити оптимальний спосіб подання швидкісних характеристик дизеля для підвищення якості досліджень та забезпечення достовірності отриманих результатів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналіз літературних даних щодо побудови швидкісних зовнішніх характеристик автомобільних двигунів виявляє різноманітні підходи до математичного моделювання та апроксимації цих характеристик.

Так, у підручнику [1] розрахунок швидкісних зовнішніх характеристик двигуна запропоновано здійснювати за методом С.Р. Лейдермана з використанням поліномів третього ступеня для

розрахунку кривої потужності двигуна та другого – для кривої крутного моменту. Така методика прийнятно апроксимує криві потужності та моменту лише у випадку, якщо графіки цих характеристик являють собою плавні криві, опуклі нагору та не мають перегинів. Для швидкісних характеристик, що мають складніший вигляд запропоновано використовувати регресійну модель з поліномами п'ятого ступеня.

У роботі [2] запропоновано удосконалений метод С.Р. Лейдермана в якому емпіричні коефіцієнти поліному розраховуються з використанням коефіцієнтів пристосованості двигуна за крутним моментом і кутовою швидкістю колінчастого вала. Цей підхід дозволив підвищити точність опису залежності крутного моменту від кутової швидкості.

У дослідженні [3] розроблено методику математичного моделювання швидкісних характеристик ДВЗ, яка враховує залежність крутного моменту від кутової швидкості колінчастого вала та коефіцієнта відкриття заслінки подачі палива. Перевірка працездатності методики в пакеті Matlab підтверджує її ефективність для моделювання характеристик двигунів.

Робота [4] присвячена аналізу швидкісних зовнішніх характеристик деяких двигунів автомобільної техніки Державної прикордонної служби України. Авторами встановлено, що традиційні методи розрахунку з використанням поліноміальних рівнянь не завжди точно описують експериментальні дані та запропоновано уточнити значення коефіцієнтів розрахункових залежностей шляхом апроксимації експериментальних даних поліномом третього ступеня, що дозволяє зменшити похибку розрахунків.

У роботі [5] запропоновано метод побудови моделі швидкісної зовнішньої характеристики двигуна на основі F-розподілу. Цей метод включає використання F-тесту з дисперсійним аналізом для оцінки різниці квадратів залишків між послідовними рівняннями регресії. Якщо тест не проходить, ступінь поліному автоматично підвищується до тих пір, поки різниця не стане незначною. Такий підхід надає теоретичний критерій для побудови моделі швидкісної зовнішньої характеристики двигуна та забезпечує високу точність апроксимації.

Автори дослідження [6] розробили математичну модель, яка описує характеристики дизеля з урахуванням швидкості (частоти) та навантаження в широкому діапазоні. Ця модель дозволяє об'єктивно оцінити тягову динаміку та витрату палива колісного трактора під час виконання основних сільськогосподарських операцій. Автори також підкреслюють важливість врахування змінного характеру тягового навантаження трактора та використання тестових циклів PowerMix для забезпечення повторюваності експериментів.

У роботі [7] розглянуто можливість застосування методу поліноміальної інтерполяції Лагранжа, для опису швидкісних зовнішніх характеристик дизеля ANDORIA. Запропонована методика дозволяє спростити експериментальні дослідження, зберігаючи мінімальну кількість вимірювальних точок з подальшою аналітичною оцінкою відсутніх даних, що сприяє оптимізації процесу випробувань та зменшенню експлуатаційних витрат.

У дослідженні [8] розроблено алгоритм для моделювання як атмосферних, так і двигунів з турбонаддувом з використанням експоненційної математичної моделі для опису кривих потужності та крутного моменту. Автори порівняли результати моделювання з даними, отриманими під час стендових випробувань двигунів, що дозволило оцінити точність запропонованої моделі.

Отже, аналіз літературних даних свідчить про наявність різних підходів до моделювання та апроксимації швидкісних характеристик автомобільних двигунів. Кожен із розглянутих методів має свої переваги та обмеження, що вказує на необхідність подальших досліджень для визначення оптимальних способів апроксимації кривої крутного моменту дизеля.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою роботи є вибір та обґрунтування методу апроксимації швидкісних зовнішніх характеристик дизелів з областю постійного крутного моменту. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі: аналіз особливостей швидкісних зовнішніх характеристик сучасних дизелів з турбонаддувом та електронними системами керування подачею палива; дослідження різних методів апроксимації швидкісних зовнішніх характеристик дизелів; оцінка точності апроксимації швидкісних зовнішніх характеристик дизелів з використанням різних методів апроксимації, визначення похибок та їх впливу на математичне моделювання процесу руху автомобіля; визначення оптимального методу апроксимації для дизелів з областю постійного крутного моменту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Швидкісна характеристика ДВЗ є визначальною залежністю, яка показує зміну основних показників двигуна, таких як ефективна потужність, крутний момент, годинна та питома витрата

палива, тощо, від кутової швидкості або частоти обертання колінчастого вала.

Швидкісні характеристики поділяються на зовнішні та часткові. Швидкісна зовнішня характеристика отримується при повній подачі палива і показує максимальні можливості двигуна по потужності та крутному моменту в усьому діапазоні кутових швидкостей колінчастого вала. Ця характеристика є визначальною для оцінки тягово-швидкісних властивостей автомобіля, оскільки вона відображає поведінку двигуна при максимальному навантаженні. Часткові швидкісні характеристики, навпаки, отримуються при неповній, але постійній подачі палива і використовуються для аналізу роботи двигуна в умовах часткових навантажень, що є типовими для реальних умов експлуатації. [9]

Традиційно, швидкісна зовнішня характеристика ДВЗ має певну форму (рис. 1): крутний момент M_k поступово зростає з підвищенням кутової швидкості колінчастого вала до досягнення максимального значення, після чого починає знижуватися. Це зниження обумовлене конструктивними особливостями двигуна та обмеженнями процесів згоряння палива. Проте у сучасних двигунах, особливо у дизелів з наддувом, спостерігається інша тенденція: після досягнення певної кутової швидкості крутний момент виходить на плато і залишається практично постійним у широкому діапазоні кутових швидкостей колінчастого вала. Це явище відоме як «плато» або «полиця» крутного моменту.

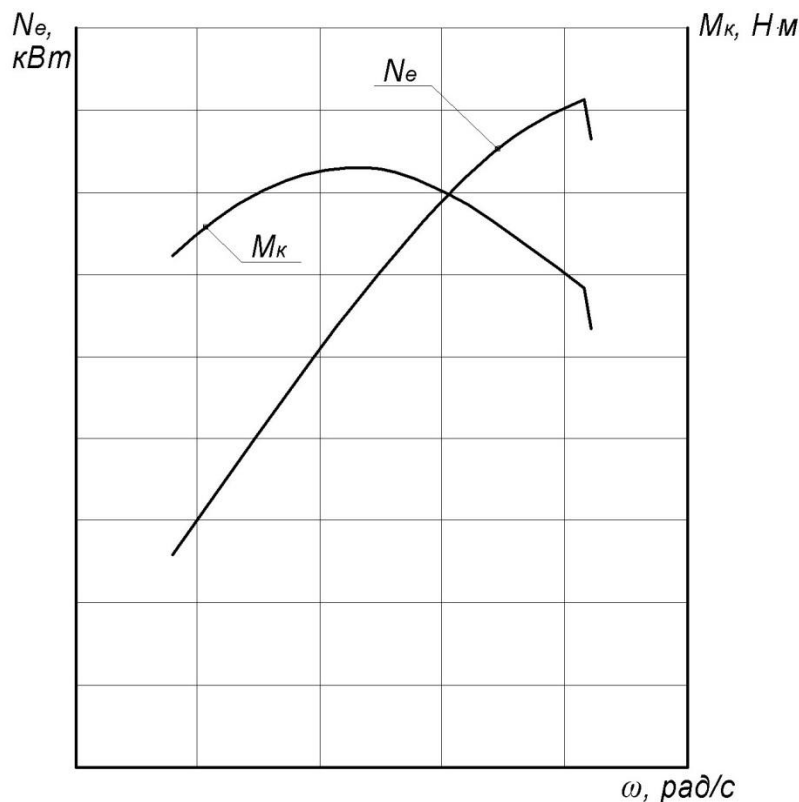


Рисунок 1 – Швидкісна зовнішня характеристика дизеля

На рис. 2 приведено швидкісні зовнішні характеристики дизелів Volkswagen CAYD (2.0 TDI) та Renault K9K (1.5 dCi), які мають характерну область постійного крутного моменту. Тут, сталі значення крутного моменту у 250 та 200 Н·м досягаються при частотах обертання 1500-2500 об/хв та 1500-3000 об/хв для двигунів Volkswagen CAYD та Renault K9K відповідно. [10, 11]

Наявність такого «плато» крутного моменту в сучасних дизелях забезпечує поліпшення динамічних характеристик автомобіля, оскільки забезпечується стабільна тяга в широкому діапазоні швидкостей та зниження витрати палива, оскільки двигун може пристосовуватися до зміни навантаження, що викликається зміною умов руху, без необхідності частих переключень передач.

Досягнення області постійного крутного моменту стало можливим завдяки впровадженню сучасних технологій, таких як турбонаддув зі змінною геометрією, послідовний турбонаддув, наддув з електричним приводом, системи багатоточкового та багаторазового впорскування, електронні системи управління двигуном, тощо. Ці технології дозволяють точно контролювати процес згоряння

та оптимізувати роботу двигуна в різних режимах, забезпечуючи постійний крутний момент на широкому діапазоні кутових швидкостей колінчастого вала двигуна.

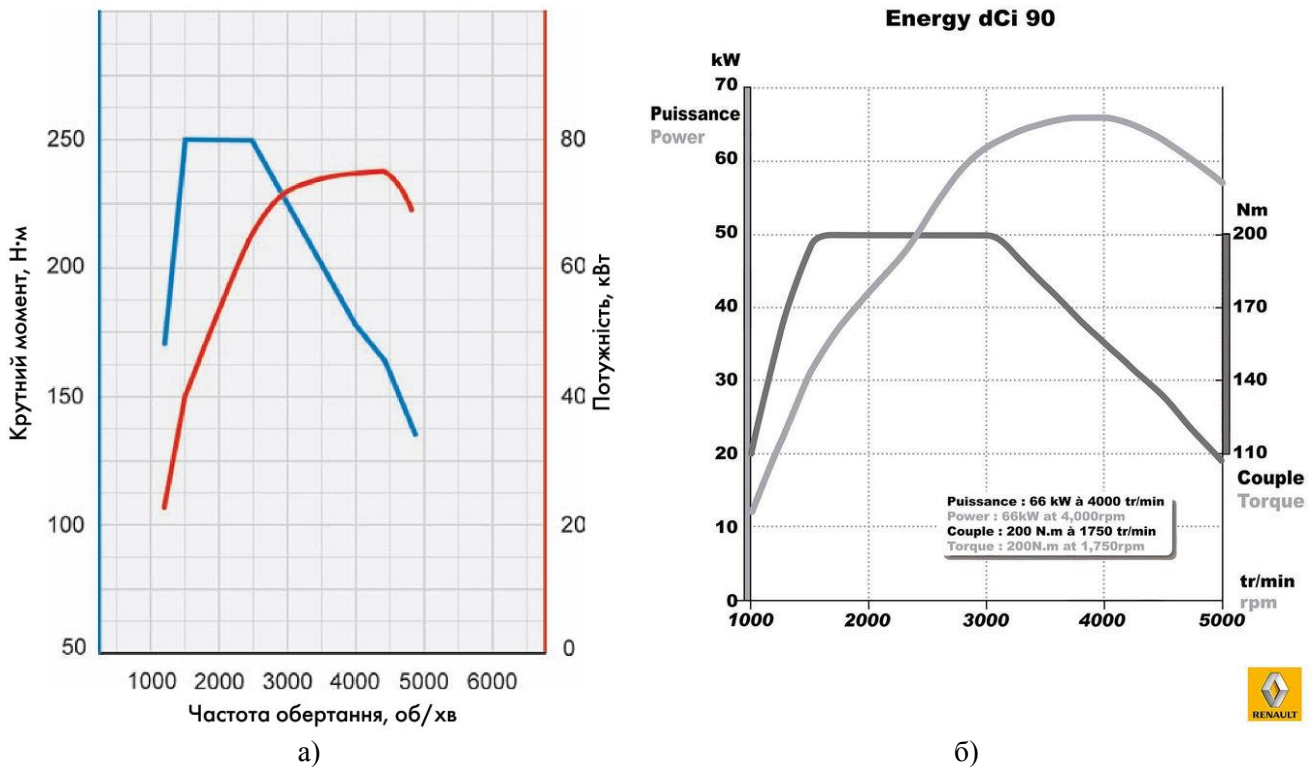


Рисунок 2 – Швидкісні зовнішні характеристики сучасних дизелів [10, 11]:
а) Volkswagen CAYD; б) Renault K9K

Проте швидкісні зовнішні характеристики, які мають область постійного крутного моменту, погано апроксимуються стандартними методами, зокрема поліноміальною апроксимацією другого ступеня. Традиційні підходи, такі як інтерполяція за методом Лагранжа, ефективно описують характеристики з плавним спадом або зростанням моменту, але виявляються малопридатними для відтворення горизонтальної ділянки («плато»).

При апроксимації швидкісної зовнішньої характеристики двигуна за допомогою інтерполяційної формули Лагранжа другого ступеня залежність апроксимаційної кривої крутного моменту від кутової швидкості задається у вигляді:

$$M_k(\omega) = M_1 \frac{(\omega - \omega_2)(\omega - \omega_3)}{(\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 - \omega_3)} + M_2 \frac{(\omega - \omega_1)(\omega - \omega_3)}{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 - \omega_3)} + M_3 \frac{(\omega - \omega_1)(\omega - \omega_2)}{(\omega_3 - \omega_1)(\omega_3 - \omega_2)}, \quad (1)$$

де M_1, M_2, M_3 – крутний момент в опорних точках, Н·м;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – кутова швидкість колінчастого вала в опорних точках, рад/с.

В якості опорних точок обираються характерні точки швидкісної зовнішньої характеристики. Доцільним є вибір таких точок: [12]

$\omega_1 = \omega_{\min}, M_1 = M_{k,\min}$ – мінімальна кутова швидкість колінчастого вала двигуна, рад/с, та крутний момент, Н·м, при цій кутовій швидкості;

$\omega_2 = \omega_M, M_2 = M_{k,\max}$ – кутова швидкість колінчастого вала двигуна при максимальному крутному моменті двигуна, рад/с та максимальний крутний момент, Н·м;

$\omega_3 = \omega_N, M_3 = M_N$ – кутова швидкість колінчастого вала двигуна при максимальній потужності двигуна, рад/с та крутний момент при максимальній потужності, Н·м.

Після підстановки значень опорних точок у залежність (1) отримуємо залежність [12]

$$M_k(\omega) = a \cdot \omega^2 + b \cdot \omega + c \quad (2)$$

де a, b, c – сталі коефіцієнти, котрі визначаються:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{M_N - M_{\kappa.\min} - \frac{M_{\kappa.\max} - M_{\kappa.\min}}{\omega_M - \omega_{\min}} \cdot (\omega_N - \omega_{\min})}{\omega_N^2 - (\omega_M + \omega_{\min}) \cdot \omega_N - \omega_{\min}^2 + (\omega_M + \omega_{\min}) \cdot \omega_{\min}} \\
 b &= \frac{M_{\kappa.\max} - M_{\kappa.\min}}{\omega_M - \omega_{\min}} - a \cdot (\omega_M + \omega_{\min}) \cdot \omega_{\min} \\
 c &= M_{\kappa.\min} - a \cdot \omega_{\min}^2 - b \cdot \omega_{\min}
 \end{aligned} \quad (3)$$

Такий метод апроксимації добре працює з швидкісними характеристиками двигунів, у яких крутний момент змінюється плавно (рис. 1), проте у випадку характеристик із вираженою областю сталого моменту подібні підходи мають значні недоліки. Поліном другого ступеня намагається з'єднати опорні точки пальною кривою, що не дозволяє точно відтворити горизонтальну ділянку «плато». Це призводить до того, що у області постійного моменту апроксимаційна функція може мати похибки, спричиняючи або надмірне підвищення значень, або їх заниження у проміжних точках.

Також виникає проблема з вибором значення точки $\omega_2 = \omega_M$, адже кутова швидкість вала двигуна при максимальному крутному моменті двигуна змінюється у широких межах. У результаті застосування стандартних методів для апроксимації характеристик двигунів з областю постійного крутного моменту дає незадовільні результати, що вимагає використання більш точних методів відтворення таких залежностей.

Одним із таких методів є метод найменших квадратів, який широко використовується для апроксимації експериментальних даних. Цей метод дозволяє знайти таку аналітичну залежність між змінними, яка мінімізує суму квадратів відхилень між теоретично розрахованими та експериментально отриманими значеннями.

Суть методу найменших квадратів полягає у підборі коефіцієнтів полінома певного ступеня так, щоб наближена функція якнайкраще описувала вихідні дані [13]. Для апроксимації швидкісної зовнішньої характеристики двигуна, зокрема залежності крутного моменту від кутової швидкості колінчастого вала, можна використовувати поліноміальну залежність виду:

$$M_{\kappa}(\omega) = a_0 + a_1 \cdot \omega + a_2 \cdot \omega^2 + \dots + a_n \cdot \omega^n, \quad (4)$$

де $M_{\kappa}(\omega)$ – апроксимоване значення крутного моменту, Н·м;

ω – кутова швидкість колінчастого вала двигуна, рад/с;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коефіцієнти полінома, які визначаються з розв'язання системи нормальних рівнянь.

Коефіцієнти полінома визначаються таким чином, щоб мінімізувати функцію похибки, яка є сумою квадратів різниць між апроксимованими та експериментальними значеннями крутного моменту:

$$S = \sum_{i=1}^m (M_{\kappa i} - M_{\kappa}(\omega_i))^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

де $M_{\kappa i}$ – експериментальні значення крутного моменту, Н·м;

$M_{\kappa}(\omega_i)$ – значення крутного моменту апроксимованої функції у відповідних точках, Н·м;

m – кількість експериментальних точок.

Експериментальні значення крутного моменту отримуються під час проведення стендових випробувань двигуна або з швидкісної зовнішньої характеристики на основі даних заводу-виробника. Кількість експериментальних точок m залежить від бажаної точності апроксимації, а також очікуваної складності розрахунків і зазвичай складає $m = 7 \dots 10$.

В таблиці 1 приведено експериментальні значення крутного моменту для дизеля Volkswagen CAYD отримані з його швидкісної зовнішньої характеристики (рис. 2а).

Таблиця 1 – Параметри швидкісної зовнішньої характеристики дизеля Volkswagen CAYD

n_i , об/хв	1200	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4400	4800
ω_i , рад/с	125,66	157,08	209,44	261,80	314,16	366,52	418,88	460,77	502,65

M_{ki} , Н·м	170	250	250	250	226	202	178	164	135
N_{ei} , кВт	21,36	39,27	52,36	65,45	71,00	74,04	74,56	75,57	67,86

На основі даних таблиці 1 було проведено апроксимацію з використанням методу найменших квадратів та отримано поліноміальні залежності від 2-го до 6-го ступеня. Для оцінки точності апроксимації використовувались коефіцієнт детермінації R^2 та середньоквадратична похибка ε .

Коефіцієнт детермінації показує, наскільки добре отримана апроксимаційна залежність описує вихідні дані. Він визначається як: [14]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (M_{ki} - M_k(\omega_i))^2}{\sum_{i=1}^m (M_{ki} - M_{кр})^2}, \quad (6)$$

де $M_{кр}$ – середнє значення крутного моменту за всіма експериментальними точками, Н·м;

Значення R^2 змінюється у межах 0...1. Чим ближче воно до 1, тим точніше апроксимаційна функція описує вихідні дані.

Середньоквадратична похибка характеризує середній рівень відхилення апроксимаційної залежності від експериментальних даних. Вона визначається як: [15]

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (M_{ki} - M_k(\omega_i))^2}. \quad (7)$$

Результати апроксимації з використанням методу найменших квадратів приведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати апроксимації кривої крутного моменту дизеля Volkswagen CAYD з використанням методу найменших квадратів.

Ступінь поліному	Коефіцієнти поліному							R^2	ε , Н·м
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6		
2	107,88	1,02	$-1,96 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-	0,796	18,442
3	-135,98	3,93	$-1,22 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	0,912	12,145
4	-623,52	11,71	$-5,45 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$-7,58 \cdot 10^{-8}$	-	-	0,964	7,696
5	-1283,53	24,93	-0,154	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$-6,55 \cdot 10^{-7}$	$3,68 \cdot 10^{-10}$	-	0,975	6,413
6	-3852,36	87,08	-0,747	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$-8,13 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-8}$	$-5,3 \cdot 10^{-12}$	0,993	3,360

Проаналізувавши дані таблиці 2 встановлено, що поліноми 2-го та 3-го ступеня не забезпечують достатньої точності апроксимації кривої крутного моменту дизеля Volkswagen CAYD, оскільки мають низькі значення коефіцієнта детермінації ($R^2 < 0,92$) та високу середньоквадратичну похибку, особливо у полінома 2-го ступеня.

Поліноми 4-го і вищих ступенів демонструють прийнятну точність ($R^2 > 0,96$), проте, навіть, вони недостатньо добре описують область постійного крутного моменту (рис. 3) та утворюють локальні екстремуми (вигини). Це спричинено тим, що глобальна поліноміальна функція намагається мінімізувати похибку на всьому діапазоні кутових швидкостей колінчастого вала, що може призводити до штучних коливань у зоні, де крутний момент повинен залишатися незмінним. Так, у полінома 4-го ступеня такий вигин кривої призводить до зростання значення максимального крутного моменту на 13,2 Н·м, а у 6-го на 9,1 Н·м.

Крім того, зі збільшенням ступеня полінома значно зростає складність математичної моделі та трудомісткість розрахунків. Тому, доцільним є використання інших методів, наприклад, кусочно-лінійної апроксимації, яка дозволяє більш точно відобразити особливості протікання швидкісної характеристики особливо у області постійного крутного моменту.

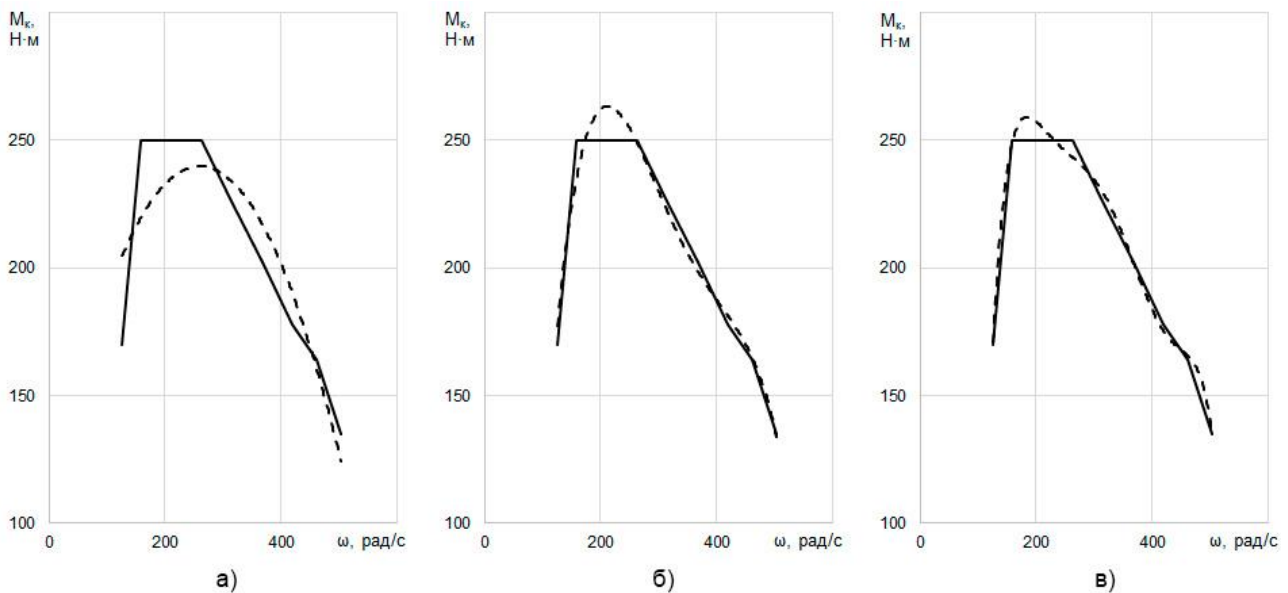


Рисунок 3 – Порівняння впливу ступеня поліному на характер апроксимованої кривої крутного моменту дизеля Volkswagen CAYD з використанням методу найменших квадратів:
а) 2-й ступінь; б) 4-й ступінь; в) 6-й ступінь.

Загальний вигляд кусочно-лінійної апроксимації для функції $M_k(\omega)$:

$$M_k(\omega) = \begin{cases} a_1 \cdot \omega + b_1, & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ a_2 \cdot \omega + b_2, & \omega_2 \leq \omega \leq \omega_3 \\ \dots & \\ a_n \cdot \omega + b_n, & \omega_{n-1} \leq \omega \leq \omega_n \end{cases}, \quad (8)$$

де a_i та b_i – коефіцієнти лінійних залежностей для кожного відрізка апроксимації, які визначаються як: [16]

$$a_i = \frac{M_{k,i+1} - M_{k,i}}{\omega_{i+1} - \omega_i}, \quad (9)$$

$$b_i = M_{k,i} - a_i \cdot \omega_i.$$

Для дизеля Volkswagen CAYD діапазон зміни частоти обертання колінчастого вала доцільно розбити на п'ять ділянок (I – 1200-1500 об/хв, II – 1500-2500 об/хв, III – 2500-4000 об/хв, IV – 4000-4400 об/хв та V – 4400-4800 об/хв) і відповідні ним кутові швидкості колінчастого вала на яких крива крутного моменту двигуна носить лінійний характер (рис.4).

У таблиці 3 приведено результати кусочно-лінійної апроксимації кривої крутного моменту дизеля Volkswagen CAYD з використанням залежностей (8) та (9) для п'яти запропонованих ділянок.

Як видно з даних таблиці кусочно-лінійна апроксимація забезпечує точний опис кривої крутного моменту ($R^2 = 1$, $\varepsilon = 0$), проте при цьому дещо зростає трудомісткість розрахунків, адже необхідно описувати кожну окрему ділянку кривої крутного моменту, що може ускладнювати використання цього методу в математичних моделях.

Для спрощення можна об'єднати деякі ділянки, у яких поведінка функції змінюється незначно. Наприклад, для дизеля Volkswagen CAYD доцільно об'єднати ділянки III, IV та V, в результаті чого точність апроксимації дещо знижується (табл. 4), так коефіцієнт детермінації R^2 складає 0,994, а середньоквадратична похибка ε – 3,249 Н·м, проте залишається достатньо високою і, навіть, переважає апроксимацію поліномом 6-го ступеня з використанням методу найменших квадратів. Характер протікання кривої крутного моменту також змінюється незначно (рис. 5)

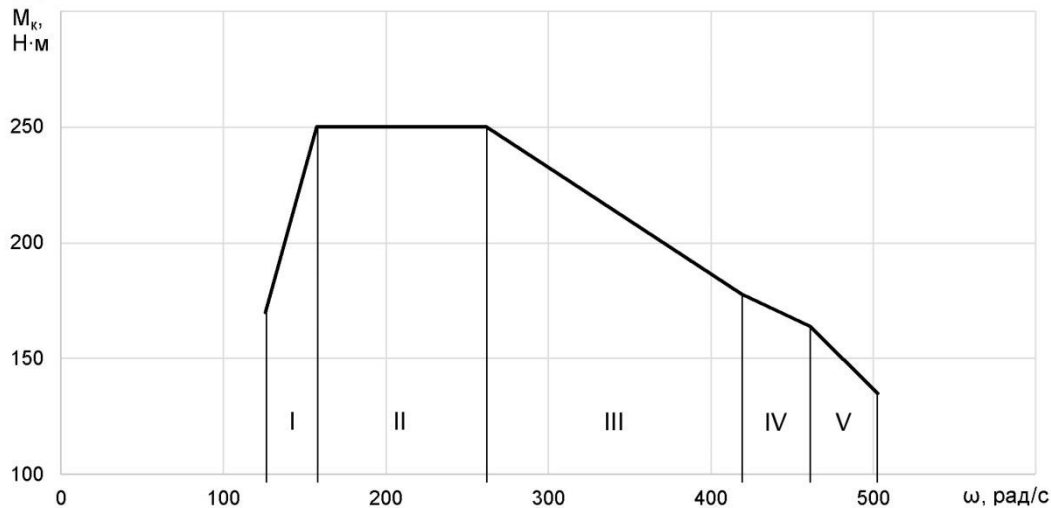


Рисунок 4 – Ділянки кривої крутного моменту

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Результати дослідження підтверджують, що традиційні поліноміальні методи апроксимації, зокрема метод Лагранжа, забезпечують прийнятну точність для опису швидкісних зовнішніх характеристик дизелів тільки з плавною зміною крутного моменту, спочатку його зростанням, досягненням максимуму, а потім – зниженням. Проте сучасні дизелі, зазвичай, мають виражену область постійного крутного моменту (так зване «плато» або «полиця») і для них такі методи демонструють значні похибки, оскільки поліноміальна функція не здатна точно відобразити горизонтальну ділянку графіка, що призводить до завищення або заниження значень моменту в проміжних точках та унеможливорює коректне моделювання поведінки двигуна з урахуванням реальних умов експлуатації автомобіля.

Таблиця 3 – Результати кусочно-лінійної апроксимації кривої крутного моменту дизеля Volkswagen CAYD з розбивкою на п'ять ділянок.

Номер ділянки	Діапазон частоти обертання n на ділянці, об/хв	Діапазон зміни кутової швидкості ω на ділянці, рад/с	Лінійні коефіцієнти	
			a_i	b_i
I	1200-1500	125,66-157,08	2,546	-150
II	1500-2500	157,08-261,80	-	250
III	2500-4000	261,80-418,88	-0,458	370
IV	4000-4400	418,88-460,77	-0,334	318
V	4400-4800	460,77-502,65	-0,692	483
Коефіцієнт детермінації R^2				1
Середньоквадратична похибка ε , Н·м				0

Таблиця 4 – Результати кусочно-лінійної апроксимації кривої крутного моменту дизеля Volkswagen CAYD з розбивкою на три ділянки.

Номер ділянки	Діапазон частоти обертання n на ділянці, об/хв	Діапазон зміни кутової швидкості ω на ділянці, рад/с	Лінійні коефіцієнти	
			a_i	b_i
I	1200-1500	125,66-157,08	2,546	-150
II	1500-2500	157,08-261,80	-	250
III	2500-4800	261,80-502,65	-0,477	375
Коефіцієнт детермінації R^2				0,994
Середньоквадратична похибка ε , Н·м				3,249

Застосування методу найменших квадратів дозволяє досягти вищої точності апроксимації, оскільки він мінімізує суму квадратів відхилень апроксимаційної кривої від експериментальних точок швидкісної зовнішньої характеристики. Проте для дизелів із областю постійного крутного моменту цей метод також має обмеження, оскільки, залежно від вибору ступеня поліному, можуть виникати небажані викривлення функції. Крім того, при визначенні показників експлуатаційних властивостей автомобіля, зокрема тягово-швидкісних властивостей, шляхом інтегрування диференціального рівняння руху автомобіля бажано використовувати поліном 2-го ступеня, адже зі збільшенням ступеня полінома значно зростає складність і трудомісткість розрахунків. При цьому поліном 2-го ступеня не забезпечує необхідної точності апроксимації ($R^2 = 0,796$). У таких випадках більш ефективним є використання кусочно-лінійної апроксимації, яка дозволяє описувати характеристику двигуна окремими відрізками прямих, що дає змогу точніше відобразити зміну моменту у всьому діапазоні кутових швидкостей колінчастого вала.

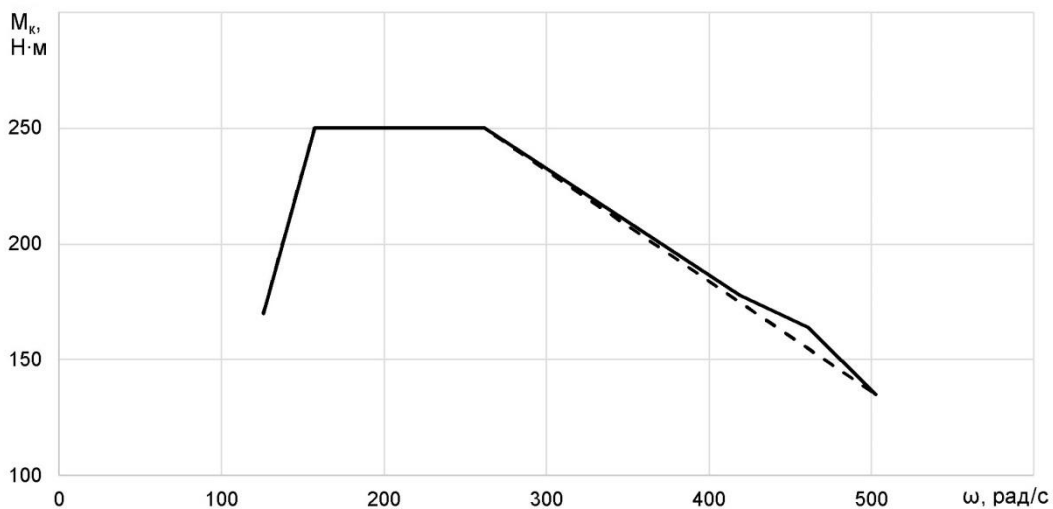


Рисунок 5 – Кусочно-лінійна апроксимація кривої крутного моменту дизеля Volkswagen CAYD з розбивкою на три ділянки

Основна перевага цього методу полягає у відсутності небажаних вигинів та коливань апроксимаційної кривої, які часто спостерігаються при використанні поліномів вищого ступеня, що дозволяє значно точніше описувати області сталого крутного моменту, які є характерними для сучасних дизелів із турбонаддувом та електронними системами управління подачею палива.

Таким чином, вибір методу апроксимації залежить від характеру швидкісної зовнішньої характеристики дизеля. Для традиційних двигунів із плавною зміною моменту достатньо поліноміальної апроксимації другого або третього ступеня, тоді як для двигунів із областю постійного крутного моменту ефективніше використовувати кусочно-лінійну апроксимацію.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження було встановлено, що сучасні дизелі, оснащені турбонаддувом та електронними системами управління подачею палива, мають швидкісні зовнішні характеристики з областями постійного крутного моменту в широкому діапазоні зміни кутових швидкостей колінчастого вала та потребують інших підходів до їх апроксимації.

Проаналізовано різні методи апроксимації швидкісних зовнішніх характеристик дизелів та встановлено, що поліноміальні методи, такі як метод Лагранжа та метод найменших квадратів можуть забезпечувати високу точність апроксимації тільки для характеристик з гладкою кривою крутного моменту, яка спочатку зростає, досягає максимуму, а потім спадає. Для дизелів із областю постійного крутного моменту такі методи демонструють значні похибки (для поліному 2-го ступеня коефіцієнт детермінації R^2 складає 0,796, а середньоквадратична похибка $\varepsilon = 18,442$ Н·м), що може призводити до некоректного математичного моделювання процесу руху автомобіля. Збільшення ступеня поліному призводить до зниження похибок, проте, навіть, поліноми 6-го ступеня не дозволяють точно описати область постійного крутного моменту та утворюють на ній локальні екстремуми (вигини).

Встановлено, що найбільш ефективним методом апроксимації швидкісних зовнішніх характеристик дизелів з областю постійного крутного моменту є кусочно-лінійна апроксимація, з розбивкою всього діапазону кутових швидкостей колінчастого вала на окремі ділянки та опису кривої крутного моменту за допомогою лінійних функцій. При розбивці діапазону кутових швидкостей швидкісної зовнішньої характеристики двигуна Volkswagen CAYD на п'ять ділянок, кусочно-лінійна апроксимація забезпечує точне описання кривої крутного моменту. Зменшення кількості ділянок до трьох призводить до деякого зниження точності апроксимації (коефіцієнт детермінації R^2 складає 0,994, а середньоквадратична похибка ε – 3,249 Н·м), проте залишається достатньо високою і переважає апроксимацію поліномом 6-го ступеня з використанням методу найменших квадратів

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи конструкції, теорія автомобілів : підручник / В.І. Сирота, В.П. Сахно, Д.М. Яценко, О.В. Сирота. – Київ : Міленіум, 2023. – 443 с.
2. Про побудову зовнішньої швидкісної характеристики автомобільного двигуна розрахунковим методом / І. М. Хоменко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 93-99. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vcndtn_2014_2_16
3. Войтенко В. А. Швидкісні характеристики двигуна внутрішнього згорання та їх математичне моделювання // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2012. – №. 9-10. – С. 16-20. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.9-10/2012.35016>
4. Псьол С. Аналіз зовнішніх швидкісних характеристик деяких двигунів автомобільної техніки Державної прикордонної служби України / С. Псьол, В. Мазур // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки. – 2019. – №. 3(81). – С. 447-463. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32453/3.v81i3.487>
5. Li J. Research on the Establishing Model Method of Engine Eternal Characteristic Curve Based on F Distribution / J. Li, G. Y. Lin, Q. F. Xia // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 971. – P. 684-687. – Режим доступу: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.971-973.684>
6. Rebrov O. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor / O. Rebrov, A. Kozhushko, B. Kalchenko, A. Mamontov, A. Zakovorotniy // EUREKA: Physics and Engineering. – 2020. – №. 4. – P. 90-100. – Режим доступу: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001352>
7. Stoeck T. Application of the polynomial interpolation method for determining performance characteristics of a diesel engine / T. Stoeck, K. F. Abramek // Metrology and Measurement Systems. – 2014. – Vol. 21. – №. 1. – P. 157-168. – Режим доступу: <https://doi.org/10.2478/mms-2014-0015>
8. Di Rado G. R. Implementation of an exponential mathematical model of power-torque curves in an algorithm for natural aspirated and turbocharged internal combustion engines / G. R. Di Rado, D. S. P. García // WSEAS transactions on applied and theoretical mechanics. Athens. – 2023. – Vol. 18. – P. 84-93. – Режим доступу: <https://doi.org/10.37394/232011.2023.18.9>
9. Абрамчук Ф.І. Автомобільні двигуни: Підручник / Ф.І. Абрамчук, Ю.Ф. Гутаревич, К.С. Долганов, І.І. Тимченко. – К.: Арістей, 2004. – 476 с.
10. Self Study Programs (SSP) 472 – The Caddy 2011 / Volkswagen AG. – Wolfsburg, 2010. – 47 p.
11. Kangoo establishes new fuel consumption record with new 'Energy' engines [Електронний Ресурс] – Режим доступу : <https://www.autosportfoto.sk/spravodajstvo/clanok/kangoo-establishes-new-fuel-consumption-record-with-new-energy-engines>
12. Сахно В.П. Математична модель для визначення тягово-швидкісних властивостей автомобіля при використанні двигунів різної потужності. / Сахно В.П., Корпач О.А. // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К. : НТУ – 2012. – Вип. 9. – С. 165-171. – Режим доступу: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Upsal_2012_9_39.pdf
13. Порівняльний аналіз методів апроксимації / Н.В. Грищенко, С.О. Семеріков, Є.В. Чернов, О.А. Хараджян – Кривий Ріг: КДПІ, 1998. – 25 с.
14. Бідюк, П. І. Прикладна статистика / П.І. Бідюк, В.Я. Данилов, О.Л. Жиров. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 186 с.
15. Колисниченко І.Ю. Поліноміальна апроксимація динамічних сигналів одноплатформених

ЖД ваг / І.Ю. Колисниченко, В.В. Ткачов // Електротехніка та електроенергетика. – 2021. – №. 2. – С. 44-52. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-2-5>

16. Задачин В. М. Чисельні методи : навчальний посібник / В. М. Задачин, І. Г. Конюшенко. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 180 с.

REFERENCES

1. Syrota, V.I., Sakhno, V.P., Yashchenko & D.M., Syrota, O.V. (2023) Osnovy konstruktsii, teorii avtomobiliv : pidruchnyk. Kyiv: Milenium.
2. Khomenko, I. M. (2014) Pro pobudovu zovnishnoi shvydkisnoi kharakterystyky avtomobilnoho dvyhuna rozrakhunkovym metodom. Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Serii : Tekhnichni nauky, 2, 93-99. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vcndtn_2014_2_16
3. Voitenko, V. A. (2014). Shvydkisni kharakterystyky dvyhuna vnutrishnoho zghorannia ta yikh matematychni modeliuvannia. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv, 9(9-10), 16-20. <https://doi.org/10.15673/2312-3125.9-10/2012.35016>
4. Psol, S., & Mazur, V. (2020). Analiz zovnishnikh shvydkisnykh kharakterystyk deiakykh dvyhuniv avtomobilnoi tekhniki derzhavnoi prykordonnoi sluzhby ukrainy. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Serii: viiskovi ta tekhnichni nauky, 81(3), 447–463. <https://doi.org/10.32453/3.v81i3.487>
5. Li, J., Lin, G. Y., & Xia, Q. F. (2014). Research on the Establishing Model Method of Engine External Characteristic Curve Based on F Distribution. Advanced Materials Research, 971, 684–687. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.971-973.684>
6. Rebrov, O., Kozhushko, A., Kalchenko, B., Mamontov, A., Zakovorotniy, A., Kalinin, E., & Holovina, E. (2020). Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. EUREKA: Physics and Engineering, 4, 90–100. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001352>
7. Stoeck, T., & Abramek, K. F. (2014). Application of the polynomial interpolation method for determining performance characteristics of a diesel engine. Metrology and Measurement Systems, 21(1), 157–168. <https://doi.org/10.2478/mms-2014-0015>
8. Di Rado, G. R., & García, D. S. P. (2023). Implementation of an Exponential Mathematical Model of Power-Torque Curves in an Algorithm for Natural Aspirated and Turbocharged Internal Combustion Engines. WSEAS transactions on applied and theoretical mechanics, 18, 84–93. <https://doi.org/10.37394/232011.2023.18.9>
9. Abramchuk, F.I., Hutarevych, Yu.F., Dolhanov, K.Ie., & Tymchenko, I.I. (2004). Avtomobilni dvyhuny: Pidruchnyk. Kyiv: Aristei.
10. Self Study Programs (SSP) 472 – The Caddy 2011 (2010). Wolfsburg: Volkswagen AG.
11. Kangoo establishes new fuel consumption record with new ‘Energy’ engines (2012). <https://www.autosportfoto.sk/spravodajstvo/clanok/kangoo-establishes-new-fuel-consumption-record-with-new-energy-engines>
12. Sakhno V.P., & Korpach O.A. (2012). Matematychna model dlia vyznachennia tiahovo-shvydkisnykh vlastyvostei avtomobilia pry vykorystanni dvyhuniv riznoi potuzhnosti. Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka. Tekhnichna serii, 9, 165-171. http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Upsal_2012_9_39.pdf
13. Hryshchenko, N.V., Semerikov, S.O., Chernov, Ye.V. & Kharadzhan O.A. (1998) Porivnialnyi analiz metodiv aproksymatsii. Kryvyi Rih: KDPI.
14. Bidiuk, P.I., Danylov, V.Ia., & Zhyrov, O.L. (2023) Prykladna statystyka. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.
15. Kolysnychenko, I., & Tkachov, V. (2021). Polynomial approximation of dynamic signals of single platform railway scales. Electrical Engineering and Power Engineering, 2, 44-52. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-2-5>
16. Zadachyn, V. M., & Koniushenko, I. H. (2014) Chyselni metody: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: Vyd. KhNEU im. S. Kuznetsia.

O. Korpach, A. Trubenok Optimal Approximation Method for Diesel Engine External Speed Characteristics

This article focuses on selecting an optimal approximation method for the external speed

characteristics of diesel engines, a critical step in mathematical modeling for evaluating vehicle performance parameters.

An analysis of modern turbocharged diesel engines with electronic fuel injection systems has shown that they exhibit a constant torque region over a wide range of crankshaft angular velocities. This feature complicates their analytical representation and necessitates the selection of an appropriate approximation method.

Various approximation techniques were examined, including polynomial approximation using Lagrange interpolation and the least squares method, as well as piecewise linear approximation. It was found that polynomial methods provide high accuracy only for torque curves with a smooth increase, peak, and subsequent decline. However, for diesel engines with a constant torque region, these methods introduce significant errors. Increasing the polynomial degree improves accuracy to some extent, but even sixth-degree polynomials fail to accurately capture the constant torque region, introducing artificial oscillations and local extrema.

Results indicate that piecewise linear approximation effectively reconstructs the external speed characteristics of diesel engines with a constant torque region. For the Volkswagen CAYD diesel engine, segmenting the angular velocity range into five sections provided the highest accuracy. Reducing the number of segments to three slightly decreased accuracy but still outperformed sixth-degree polynomial approximation using the least squares method.

Consequently, piecewise linear approximation is identified as the most suitable method for approximating the external speed characteristics of diesel engines with a constant torque region.

Keywords: diesel engine, external speed characteristics, approximation, polynomial approximation, piecewise linear approximation, mathematical modeling.

КОРПАЧ Олексій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, e-mail: korpach1988@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2496-4395>

ТРУБЕНЮК Андрій Анатолійович, аспірант, Національний транспортний університет, e-mail: andrey-akpp@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0003-5875-7647>

Oleksii KORPACH, PhD in Engineering, Associate professor, Associate professor Department of Automobiles, National Transport University, e-mail: korpach1988@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-2496-4395>

Andrii TRUBENOK, Postgraduate student, National Transport University, e-mail: andrey-akpp@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0003-5875-7647>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1728

УДК 631.362.3
UDC 631.362.3

Крайник Л.В.¹, Дуфанець І.Г.²
1-БАТ «Укравтобуспром»

2-Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій Імені С.З. Гжицького

ФОРМУВАННЯ СХЕМИ ПРИВОДУ ГАЛЬМ І ДИФЕРЕНТУ МОНОБЛОЧНОГО КУЗОВА ТРИВІСНОГО АВТОБУСА

Першочергові роботи, які виникають під час розробки гальмівної системи автобуса та інших транспортних засобів, полягають у формуванні структури гальмівної системи. Для тривісних автобусів з моноблочним кузовом проблемним є визначення оптимальної схеми контурів з усіх можливих варіантів з метою забезпечення стабільності, безпеки та ефективності гальмування в різних умовах експлуатації з дотриманням вимог нормативних документів, зокрема Правил ЄЕК ООН № 13. Визначальну роль при цьому відіграє динаміка перерозподілу навантажень на осі під час гальмування, що супроводжується зміною положення центра мас та диферентом кузова автобуса, який впливає на ефективність гальмування, стійкість і керованість транспортного засобу. Додатковим чинником є нерівномірний розподіл навантажень на осі автобуса, середня вісь є ведучою з здвоєними шинами з найбільшим навантаженням, а передня і задня осі – з одинарними шинами і практично вдвоє меншими навантаженнями. Нормативні вимоги чинні як щодо номінальної, так і спорядженої мас автобуса, що суттєво відрізняються з умов навантажень на осі і центру мас. Значний вплив на динаміку перерозподілу навантажень має і кінематика напрямних штанг пневмопідвіски автобуса.

Опрацьовано питання зближення координат центру диференту кузова (до зведеного центру мас кузова) з умов кінематики пневмопідвіски та схеми контурів робочої гальмівної системи.

Ключові слова: автобус, тривісний, гальмівна система, диферент кузова, пневматична схема, перерозподіл навантаження, гальмування.

ВСТУП

При впровадженні у виробництво сімейства великих двовісних та особливо великих тривісних автобусів з моноблочним кузовом, у виробників виходить на одну з перших позицій уніфікація кузовних елементів, вузлів та агрегатів, у тому числі гальмівної системи відповідного модельного ряду (рис.1). Уніфікація елементів гальмівної системи значно ускладнює процес формування гальмівного приводу [1,2].

Основною проблемою в даному питанні є оптимізація схем поділу контурів гальмівного приводу 3-вісних автобусів з урахуванням максимальної уніфікації систем і агрегатів з базовою двовісною моделлю, а також забезпечення відповідності вимогам сповільнення при гальмуванні одним з контурів робочої гальмівної системи при використанні його як одного з можливих варіантів запасної гальмівної системи, який відповідно до нормативно правових документів повинен забезпечувати сповільнення не менше $2,5 \text{ м/с}^2$ для автобусів категорії М3 [1,3].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відомі дослідження у сфері синтезу гальмівних систем тривісних автомобілів зосереджені насамперед на значно більш розповсюджених вантажівках, як підвищеної прохідності з одинарними шинами на всіх осях, так і загального призначення зі здвоєними шинами 2-ї і 3-ї осей [3-7]. При цьому, однак, в цих конструкціях домінує так зв. балансірна ресорна підвіска задніх осей з однаковим статичним навантаженням на осі, що дозволяє звести схему до еквівалентної двовісної схеми. З аналізу існуючих джерел інформації та вихідних даних для розробки гальмівної системи тривісного автобуса по проекту «Богдан А231» теоретично можливими є три варіанти схеми міжосьового поділу приводу, (окрім діагональної), кожен з них має свої конструктивні особливості та вплив на ефективність і безпеку гальмування транспортного засобу. а саме:

- 1) I контур – привід та гальмівні механізми переднього моста,
II контур – привід та гальмівні механізми середнього та заднього мостів;
- 2) I контур – привід та гальмівні механізми переднього та заднього мостів,
II контур – привід та гальмівні механізми середнього моста;
- 3) I контур – привід та гальмівні механізми переднього та середнього мостів,
II контур – привід та гальмівні механізми заднього моста.

Враховуючи суттєво різний розподіл навантажень на осі, попередньо проведені розрахунки ефективності вищезазначених варіантів засвідчили перевагу власне 2-ї схеми контурів (передня і

задня осі з одинарними шинами у I контурі та середня, ведуча вісь з здвоєними шинами у II контурі) [8]. Разом з тим при повній масі автобуса сповільнення при використанні контуру II було на межі допустимого згідно нормативних вимог [1, 9], що обумовило пошук та опрацювання додаткових рішень щодо підвищення ефективності запасної гальмівної системи.

та наявність крім вище наведених варіантів розподілу контурів опрацьовано ще один з можливих варіантів розподілу контурів – з вк, а саме:

I контур – привід та гальмівні механізми переднього та заднього мостів;

II контур – привід та гальмівні механізми середнього та заднього мостів;

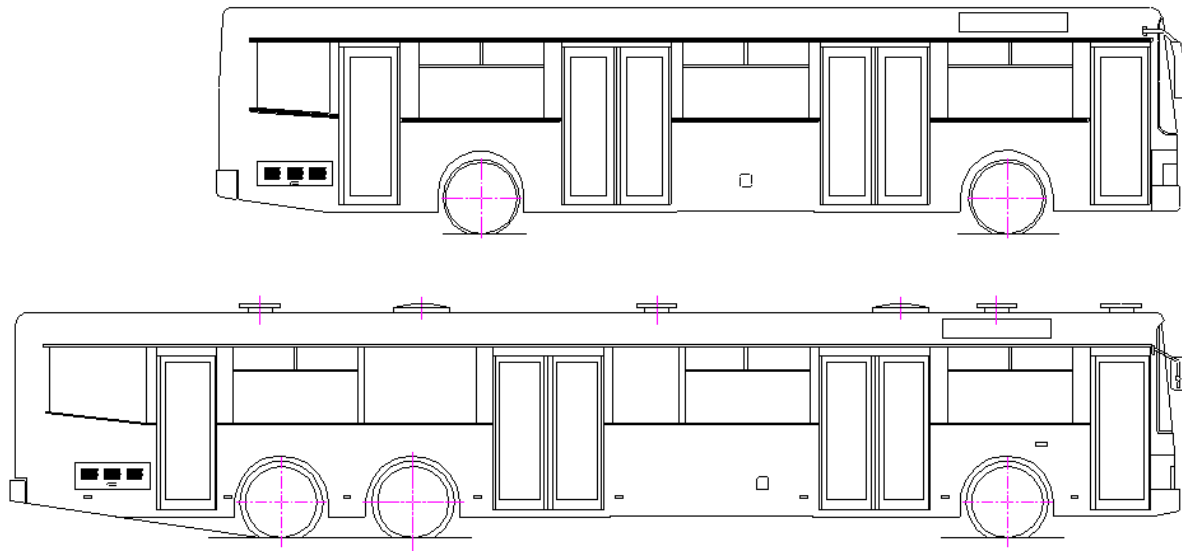


Рисунок 1 Великий двохвісний і надвеликий тривісний автобуси з моноблочним кузовом.

ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розроблення схеми контурів приводу гальмівної системи з умов ефективності та забезпечення раціонального керування диферентом моноблочного кузова тривісного автобуса з урахуванням особливостей його кінематики та динаміки при гальмуванні. Це передбачає всебічний аналіз конструктивних і функціональних рішень, які дозволяють оптимізувати розподіл гальмівних зусиль між осями, підвищити стійкість і керованість транспортного засобу під час гальмування, а також забезпечити кращу стабілізацію просторового положення кузова та зменшити динамічний перерозподіл навантажень на осі, незалежно від змін навантаження чи режимів руху.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проведені аналітичні дослідження динаміки гальмування тривісних автобусів вказують, що з умов забезпечення необхідної ефективності гальмування при спорядженій масі, де перепад осьових навантажень при задньомоторному компонуванні автобуса особливо відчутний для першої та другої осей, (відповідно з дисковими та барабанными гальмами), ефективним рішенням було б підключення гальм третьої осі до обидвох контурів. Цей варіант розподілу контурів гальмівної системи автобуса передбачає задіяння при роботі приводу та гальмівних механізмів заднього моста у I та II контурах. При такій комбінації виникає питання розділення контурів I та II у випадку виходу з ладу одного з них, з метою безпеки руху та дотримання вимог нормативно правових документів [1]. З цією метою з огляду та аналізу існуючої апаратури пневмоприводу гальм колісних машин, прийнято рішення застосувати прискорювальний клапан Knorr-Bremse для задньої, 3-ї осі з функцією двох незалежних входів та підєднанням до них відповідно контурів I і II [10].

Додатковими факторами, які формують умови чіткої аналітичної оцінки ефективності вибору схеми приводу для особливо великого тривісного автобуса є, крім звичайного для класичних схем двохвісних автобусів динамічного перерозподілу осьових навантажень при гальмуванні, є також істотний вплив значного збільшення габаритної довжини і, відповідно, слабкого взаємозв'язку коливань кузова у зонах передньої і задньої підвіски, що обумовлює необхідність враховувати кінематичні схеми підвіски [4,6,11]. Відповідно, кінематика підвісок має значний вплив на переміщення умовного центру мас та динамічний перерозподіл осьових навантажень, як при повній,

так і при спорядженій масах автобуса, що також впливає на ефективність гальмування та відповідність нормативним вимогам.

Враховуючи вищенаведене, важливим етапом конструктивного синтезу гальмівного приводу тривісного автобуса є формування антикльовної кінематики підвіски з максимальним наближенням координат центру диференту кузова $O(h_1, l_{01})$ до зведеного центру мас кузова $O(h, a)$. – рис.2.

(уточнити на рис.2 позначення по O і O_1 та

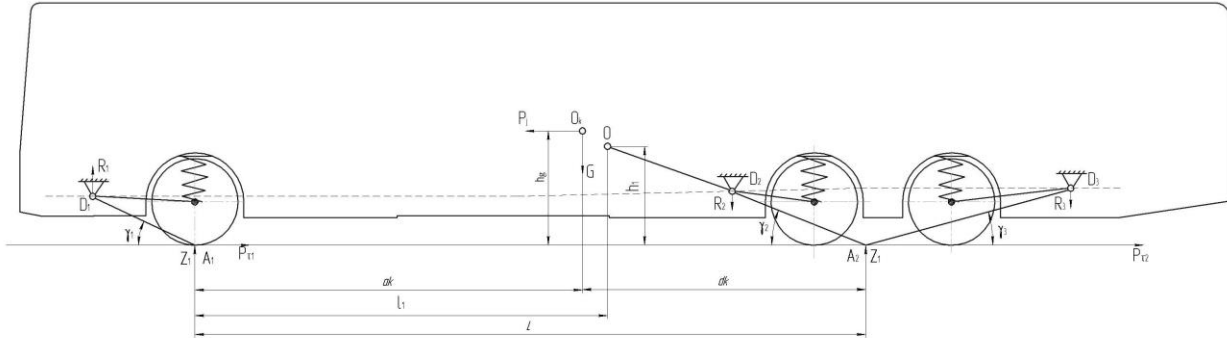


Рисунок 2 Сили, що діють на гальмуючий автобус з антикльовним варіантом кінематичної схеми підвіски.

Розглянемо як один з варіантів розв'язання поставленої задачі, підбір параметрів направляючих пристроїв підвіски з поздовжніми або поздовжньо-поперечними важелями з метою повної ліквідації кута диференту кузова при гальмуванні.

Формули для визначення координат центру диференту відображаються наступним чином:

$$l_{01} = \frac{L \tan \gamma_2}{\tan \gamma_1 + \tan \gamma_2} \quad (1)$$

$$h_1 = l_{01} \tan \gamma \quad (2)$$

де l_{01} і h_1 – відстань від центру диференту O відповідно до вертикальної площини, яка проходить через передню вісь автобуса і до поверхні дороги; γ_1 і γ_2 - кути, які залежать від розміщення центрів повороту D_1 і D_2 направляючих забудови підвіски (рис.2).

Еквівалентний центр диференту кузова щодо 2 і 3 осей формується співвідношенням навантажень між осями.

Аналіз показав, що для ліквідації диференту кузова при гальмуванні автобуса необхідно виконати умову:

$$a_k \beta_r \tan \gamma_1 + b_k (1 - \beta_r) \tan \gamma_2 = h_g \quad (3)$$

де: a_k – відстань від центру передньої осі до вертикальної проекції центру мас автобуса; b_k – відстань від еквівалентного центру роздільних підвісок 2-ї і 3-ї осей до вертикальної проекції центру мас на опорну поверхню; β_r - коефіцієнт розподілу сумарної гальмівної сили між передніми, середніми і задніми колесами, що діє в напрямку поздовжньої осі автобуса.

Використовуючи вираз для координат центру диференту, умову відсутності диференту можна записати так:

$$h_1 = \frac{h_g}{1 - \left[\frac{\beta_r}{l_{01}} - \frac{(1 - \beta_r)}{L - l_{01}} \right] (l_{01} - a_k)} \quad (4)$$

де значення β_r визначається співвідношенням:

$$\beta_{\Gamma} = \frac{\sum_j^2 (X_{1j} \cos \alpha_{1j} - Y_{1j} \sin \alpha_{1j})}{\sum_j^2 (X_{1j} \cos \alpha_{1j} - Y_{1j} \sin \alpha_{1j} + X_{2j} + X_{3j})} M \quad (5)$$

де: X_{1j} , X_{2j} , X_{3j} , Y_{1j} – дотичні реакції, які діють в контакті колеса з дорогою і скеровані відповідно вздовж і перпендикулярно до площини його обертання.

Зазначимо, що при не повернутих керованих колесах, тобто при $\alpha_{1j} = 0$, можна приймати $\beta_{\Gamma} = \beta_{\text{Д}}$, де $\beta_{\text{Д}}$ – коефіцієнт розподілу сумарного гальмівного моменту між передніми, середніми і задніми колесами.

Приведена залежність $h_1(\ell_{01})$ є геометричним місцем центрів диференту, для яких при гальмуванні автобуса поздовжньо – кутові коливання кузова відсутні. Зокрема, при $h_1 = h_g$ отримана умова виконується у двох випадках:

1) при $\ell_{01} = a_k$ (центр диференту збігається із центром мас кузова);

2) при $\ell_{01} = \beta_{\Gamma} L$ (при виконанні другої умови відсутні також вертикальні коливання кузова при гальмуванні).

Для тривісного автобуса значення β_{Γ} можна визначити за формулою:

$$\beta_{\Gamma} = \frac{M_{\Gamma 1}}{M_{\Gamma 1} + M_{\Gamma 2} + M_{\Gamma 3}} \quad (6)$$

$$M_{\Gamma i} = P_{\Gamma i} \cdot r_{\delta} \quad (7)$$

де: $M_{\Gamma i}$ – гальмівний момент, r_{δ} – динамічний радіус колеса.

На основі отриманого значення β_{Γ} та з врахуванням формул (1), (2), (4) можна підібрати координати точок повороту D_1 та D_2 таким чином, що при гальмуванні автобуса поздовжньо-кутові коливання кузова будуть мінімізовані.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

У ході дослідження, спрямованого на формування схеми приводу гальм і мінімізації диференту моноблочного кузова тривісного автобуса, було отримано результати, що дозволяють комплексно сформувати відповідні технічні рішення. Враховуючи суттєві відмінності цього класу автобусів у порівнянні до звичних тривісних вантажівок щодо нерівномірного розподілу навантажень на осі та відсутність кінематично зв'язаних балансирних підвісок 2-ї і 3-ї осей слід констатувати необхідність окремого підходу – методики формування схеми контурів пневмоприводу гальм. При цьому тематика приводу гальм тривісних дволанкових (зчленованих) автобусів вимагає окремого дослідження і уточнень з врахуванням динаміки навантажень зчпного пристрою (поворотного круга). Моделювання динаміки гальмування з урахуванням різних варіантів можливих схем приводу та розподілу гальмівних зусиль між передньою, середньою та задньою осями продемонструвало значний вплив конфігурації приводу на ефективність запасної гальмової системи та збільшення безпеки руху. Особливої уваги заслуговують результати, які свідчать про ефективність адаптивної схеми керування, що забезпечує корекцію гальмівних моментів залежно від зміни положення центра мас і умов руху, зокрема при неповному завантаженні автобуса чи під час гальмування на ухилі чи підйомі.

Щодо диферента кузова, встановлено, що варіації розміщення навантаження та зміщення центра мас мають істотний вплив на просторову орієнтацію кузова, що, своєю чергою, впливає на розподіл навантаження між осями. Розроблена модель дозволила ідентифікувати критичні режими, за яких значний диферент суттєво впливає на динаміку гальмування та може спричинити втрату курсової стійкості руху.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження підтверджують доцільність інтегрованого підходу до побудови гальмівної системи та системи формування диференту кузова, що відчутно відрізняються від тривісних вантажівок з балансирною ресорною підвіскою 2-ї і 3-ї осей. Отримані дані можуть бути використані як основа для удосконалення конструктивних рішень при проектуванні сучасних тривісних автобусів, зокрема в частині забезпечення активної безпеки руху та, відповідно, максимальної ефективності запасної (аварійної) гальмової системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Правила UN/ECE R 13. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів категорій М, N і O стосовно гальмування. – Введено вперше; Ввід. 24.07.2002. [Чинні від 14.01.2008]. – Женева : Європейська Економічна Комісія Організації Об'єднаних націй, 2008. – 276 с.
- 2.Свинарчук О.В., Крайник Л.В., Дуфанець І.Г., та інші Надвеликий тривісний міський автобус/тролейбус «Богдан» А231 «Автотехніка. Автобуси, вантажівки» - Львів. 2007. 01/07 с.8-16.
- 3.Богомолів В.О., Клименко В.І., Дон Є.Ю., Тімонін В.О., Вербицький В.І., Особливості вибору раціональних схем компоновання гальмівного приводу при забезпеченні високої ефективності гальмування багатовісного транспортного засобу. Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів. Харків, 2019. Вип. 17. С. 62-73.
- 4.Крайник Л.В., Дуфанець І.Г. Обґрунтування та оцінка ефективності схеми гальмового приводу тривісного моноблочного автобуса. Автомобільний транспорт, ХНАДУ, Харків, 2008. Вип. 42. С 17-19.
- 5.Крайник Л.В., Дуфанець І.Г. Динаміка і параметрична оптимізація гальмового приводу тривісного автобуса з моноблочним кузовом. Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. Харків, 2009. Вип. 2(9). С 33-36
- 6.Дем'янюк В.А. Аналіз процесу гальмування автобусів та синтез їх гальмових керувань // Вісник НУ "Львівська політехніка". "Динаміка, міцність та проектування машин і приладів" – Львів. 2004. - №509. – с.17-20.
- 7.Knorr-Bremse. (2015). Agricultural and forestry vehicles. Brake equipment catalogue, Y206317 - (EN – Rev. 001).
- 8.Леонтьєв Д. М. (2021) Теоретичні основи гальмування багатовісних транспортних засобів з електропневматичною гальмовою системою. / дис. на здобуття ступеня докт. техн. наук. Леонтьєв Дмитро Миколайович // Харків: ХНАДУ.
- 9.Nunney MJ. Light and Heavy Vehicle Technology. Routledge; 2007.
- 10.Kamiński, Z.. Calculation of the optimal braking force distribution in three-axle trailers with tandem suspension. Acta Mechanica et Automatica Vol. 16, no 3, 2022 pp. 189-199.
- 11.Сахно В.П. та ін. Експлуатаційні властивості автотransпортних засобів. В 3 ч. Ч 1. Динамічність та паливна економічність автотransпортних засобів : [навчальний посібник] / В.П. Сахно, А.В. Костенко, М.І. Загороднов та ін. – Донецьк: Вид-во «Ноулідж» (донецьке відділення), 2014. – 444 с. ISBN 978-617-579-924-6 ISBN 978-617-579-925-3 (Ч. 1).

REFERENCES

- 1.Pravyla UN/ECE R 13. Yedyni tekhnichni prypysy shchodo ofitsiinoho zatverdzhennia dorozhnikh transportnykh zasobiv katehorii M, N i O stosovno halmuvannia. – Vvedeno vpershe; Vvid. 24.07.2002. [Chynni vid 14.01.2008]. – Zheneva : Yevropeiska Ekonomichna Komisiia Orhanizatsii Ob'iednanykh Natsii, 2008. – 276 s.
- 2.Svynarchuk O.V., Kraynyk L.V., Dufanets I.H., ta inshi. Nadvelyky tryvisnyi miskyi avtobus/troleibus «Bohdan» A231 «Avtotekhnika. Avtobusy, vantazhivky» – Lviv. 2007. 01/07 s.8-16.
- 3.Bohomolov V.O., Klymenko V.I., Don Ye.Yu., Timonin V.O., Verbytskyi V.I. Osoblyvosti vyboru ratsionalnykh skhem komponuvannia halmivnoho pryvodu pry zabezpechenni vysokoi efektyvnosti halmuvannia bahatovisnoho transportnoho zasobu. Tekhnichniyi serv is ahropromyslovoho lisovoho ta transportnoho kompleksiv. Kharkiv, 2019. Vyp. 17. S. 62-73.
- 4.Kraynyk L.V., Dufanets I.H. Obhruntuvannia ta otsinka efektyvnosti skhemy halmovoho pryvodu tryvisnoho monobl ochnoho avtobusa. Avtomobilnyi transport, Kharkiv, 2008. Vyp. 42. S. 17-19.
- 5.Kraynyk L.V., Dufanets I.H. Dynamika i parametrychna optymizatsiia halmovoho pryvodu tryvisnoho avtobusa z monoblochnym kuzovom. Visti Avtomobilno-dorozhnoho instytutu. Kharkiv, 2009. Vyp. 2(9). S. 33-36.
- 6.Demianiuk V.A. Analiz protsesu halmuvannia avtobusiv ta syntez yikh halmovykh keruvan // Visnyk NU "Lvivska politekhnika". "Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i pryladiv" – Lviv. 2004. - №509. – s.17-20.
- 7.Knorr-Bremse. (2015). Agricultural and forestry vehicles. Brake equipment catalogue, Y206317 - (EN – Rev. 001).

8.Leontiev D. M. (2021) Teoretychni osnovy halmuvannia bahatovisnykh transportnykh zasobiv z elektro pnevmatychnoiu halmovoiu systemoiu. / dys. na здобuttia stupenia dokt. tekhn. nauk. Leontiev Dmytro Mykolaiovych // Kharkiv: KHNADU.

9.Nunney M.J. Light and Heavy Vehicle Technology. Routledge; 2007.

10.Kaminski, Z. Calculation of the optimal braking force distribution in three-axle trailers with tandem suspension. Acta Mechanica et Automatica Vol. 16, no 3, 2022 pp. 189-199.

11.Sakhno V.P. ta in. Ekspluatatsiini vlastyvoli avtotransportnykh zasobiv. V 3 ch. Ch. 1. Dynamichnist ta palyvna ekonomichnist avtotransportnykh zasobiv : [navchalnyi posibnyk] / V.P. Sakhno, A.V. Kostenko, M.I. Zahorodnov ta in. – Donetsk: Vyd-vo «Noulidzh» (donetske viddilennia), 2014. – 444 s. ISBN 978-617-579-924-6 ISBN 978-617-579-925-3 (Ch. 1).

L. Krainyk, I. Dufanets Formation of the brake and differential drive scheme of the mono-block body of a three-axle bus.

The primary tasks that arise during the development of the braking system of a bus and other vehicles are to form the structure of the braking system. For three-axle buses with a monoblock body, the problem is to determine the optimal circuit scheme from all possible options in order to ensure stability, safety and braking efficiency in various operating conditions in compliance with the requirements of regulatory documents, in particular UNECE Regulations No. 13. The dynamics of redistribution of loads on the axles during braking plays a decisive role, which is accompanied by a change in the position of the center of mass and the trim of the bus body, which affects the braking efficiency, stability and controllability of the vehicle. An additional factor is the uneven distribution of loads on the bus axles, the middle axle is the driving one with dual tires with the highest load, and the front and rear axles – with single tires and almost half the loads. Regulatory requirements apply to both the nominal and curb weights of the bus, which differ significantly from the conditions of axle loads and the center of mass. The kinematics of the guide rods of the bus air suspension also have a significant impact on the dynamics of load redistribution.

The issue of approaching the coordinates of the center of the body trim (to the reduced center of mass of the body) from the conditions of the air suspension kinematics and the circuit diagram of the working brake system has been studied.

Keywords: bus, three-axle, brake system, body trim, pneumatic circuit, load redistribution, braking.

КРАЙНИК Любомир Васильович, доктор технічних наук, голова правління ВАТ «Укравтобуспром» e-mail: l.kraynyk@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-0524-9126>

ДУФАНЕЦЬ Ігор Гнатович, старший викладач, кафедри автомобілів та тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького e-mail: dufaneci@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0001-2019-4362>

Lubomyr KRAYNYK Doctor of Technical Sciences, head of the board JSC "Ukraudobusprom" e-mail: l.kraynyk@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-0524-9126>

Ihor DUFANETS Senior Lecturer, Department of Automobiles and Tractors, Lviv National Stepan Gzhytsky University of Veterinary Medicine and Biotechnology e-mail: dufaneci@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-2019-4362>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1729

Криштопа С.І., Криштопа Л.І., Добуш А.І., Мисів О.О., Матвієнко Р.М., Копильців Д.В.
Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, Україна

ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОВІТРЯНИХ СИСТЕМ НА ТРАНСПОРТІ

Проаналізовані можливості використання енергетичних систем на основі стисненого повітря в силових приводах автомобільного транспорту. Проаналізовано переваги та обмеження пневматичних систем у порівнянні з традиційними гідравлічними та електромеханічними приводами. Визначено основні технічні параметри, що впливають на ефективність таких систем, зокрема рівень енергоспоживання, втрати енергії та надійність роботи в умовах підвищених навантажень. Розглянуто перспективи впровадження сучасних технологій акумулювання та регулювання стисненого повітря для підвищення продуктивності та екологічної безпеки обладнання. Запропоновано шляхи оптимізації систем, що сприятимуть зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню енергоефективності транспортних засобів. Встановлено, що енергетичні системи, що працюють на стисненому повітрі, можуть застосовуватися як основне джерело живлення без викидів або як допоміжна силова установка в автомобільному транспорті, забезпечуючи нульові викиди вуглецю та покращену загальну енергоефективність інтегрованих конструктивних рішень. У статті представлено детальну технологічну розробку енергетичних систем на базі стисненого повітря, узагальнено дослідження силових агрегатів, що працюють на цій технології у транспортному секторі. Особливу увагу приділено розробці нових технологій, створенню прототипів і інтеграції пневматичних систем. Крім того, детально розглянуто гібридні технології на основі стисненого повітря, які використовують різні методи пневматичної гібридизації, що дозволяє краще використовувати їхні переваги та обмеження. Обговорюються перспективи та виклики впровадження технологій на основі стисненого повітря у силових приводах автомобільного транспорту. Очікується, що модернізація енергетичних систем у цьому секторі сприятиме технологічному розвитку та впровадженню екологічно чистих рішень без викидів на транспорті.

Ключові слова: автомобільний транспорт, повітряні технології, пневмосистеми, стиснене повітря, гібридні силові приводи, енергоефективність.

ВСТУП

Гібридна трансмісія на даний момент є одним із найбільш цікавих рішень для покращення економії палива та скорочення викидів із відносно низькими загальними капітальними витратами порівняно з електричними трансмісіями, що використовують літій-іонні батареї. Гібридний силовий агрегат складається з двох силових агрегатів, включаючи двигун внутрішнього згоряння та допоміжний силовий агрегат із екологічно чистим джерелом енергії, таким як акумулятор або блок стисненого повітря. Гібридна трансмісія дозволяє звичайним ДВЗ на викопному паливі працювати в оптимізованих умовах із меншим споживанням палива та викидами забруднюючих речовин.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Перший одноциліндровий двигун на стисненому повітрі, у якому нагрівач бака з гарячою водою використовувався для нагрівання стисненого повітря перед розширенням у циліндрі двигуна розробив у 1886 році Луїс Мекарські [1]. Роберт Гарді розвинув цю концепцію, застосувавши передову систему повторного підігріву на двигуні з одноступеневим розширенням із можливістю регенерації енергії гальмування двигуном [2]. Двоступінчастий повітряний двигун під назвою Hoadley-Knight system був розроблений з метою подовження робочого шляху локомотива до перезаправлення системи [3]. Системи Хоадлі використовувалися в Нью-Йорку протягом 1880–1900 рр., при цьому стиснене повітря подавалося з парової компресорної станції потужністю 1500 кінських сил. Після Другої світової війни різке зниження цін на викопне паливо сприяє комерціалізації та розвитку бензинових і дизельних двигунів для транспортних засобів або локомотивів, що призвело до зменшення кількості двигунів, що працюють на стисненому повітрі.

Проте дослідницькі інтереси та технологічні розробки в системі двигунів зі стисненим повітрям знову виникли в 1970-х роках через занепокоєння енергетичною кризою та екологічними проблемами. У 1979 році Террі Міллер розробив автомобіль з пружинним приводом і продемонстрував, що стиснене повітря є ідеальним середовищем для зберігання енергії [4]. У 1993 році Террі Міллер спільно з Тобі Баттерфілдом розробив двигун з пневматичним приводом, і автомобіль був названий повітряним автомобілем Spirit of Joplin. Винаходи Террі Міллера є важливою віхою в дослідженнях застосування двигунів на стисненому повітрі в транспортних засобах. Протягом наступних десятиліть було проведено кілька досліджень, натхненних роботою Террі Міллера.

Більшість досліджень, проведених протягом останнього десятиліття щодо двигуна, що працює на стисненому повітрі, ґрунтувалися на поршневій структурі. Лю створив математичні моделі двигуна, що працює на стисненому повітрі [5], і проаналізували робочі характеристики двигуна, як при одноступінчастому, так і при двоступінчастому розширенні. Результати показали, що двигун із зворотно-поступальним поршнем є ідеальною структурою для двигуна, що працює на стисненому повітрі. В [6] проаналізував теоретичний цикл двигуна, що працює на стисненому повітрі, і дійшли висновку, що робоча потужність двигуна була в лінійній позитивній кореляції з початковою температурою процесу розширення, і можливим методом збільшення робочої потужності двигуна є впровадження багатоступеневого, квазіізотермічного розширення стисненого повітря.

Автори [7] повідомили про оптимізаційний дизайн теоретичного циклу двигуна, що працює на стисненому повітрі, використовуючи метод багатоцільової оптимізації. Дослідження продемонструвало, що максимальна ефективність циклу може бути отримана при ступені стиснення 13. Оптимальна конструкція для траєкторії зворотно-поступального руху поршня також була запропонована шляхом впровадження подвійного механізму колінчастого вала [8]. Моделювання показало, що поршень може залишатися нерухомим до того, як тиск у циліндрі підніметься до тиску впуску, коли буде прийнята оптимізована траєкторія поршня. Крім того, швидкість поршня може бути лінійно залежною від площі потоку впускного клапана, доки тиск у циліндрі двигуна не досягне максимуму, а потім залишається постійним після закриття впускного клапана.

Віртуальний прототип із новою розробленою системою клапанів був створений для вивчення динамічних характеристик повітряного двигуна [9], а також досліджено і оптимізовані стратегії керування клапанами, що внесло внесок у теоретичне розуміння технології повітряного двигуна. Після попереднього прогресу команда продовжила розвиток динамічного теплообміну для дослідження падіння температури під час робочих умов повітряного двигуна. Крім того, була запропонована технологія температурної компенсації [10] для усунення ризику блокування льодом внаслідок ефекту дроселювання стисненого повітря.

За винятком двигуна поршневого типу з поршневим рухом, також були зроблені спроби дослідження інших типів двигунів, що працюють на стисненому повітрі. Типові двигуни на стисненому повітрі з різними типами розширювальних машин наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Двигуни на стисненому повітрі з різними типами розширювальних машин

Рік	Автор	Тип двигуна	Особливості
2009	Shen та ін. [11]	повітряний двигун лопатевого типу	Ефективність вище 70% при швидкості мотоцикла понад 20 км/год. Споживання електроенергії становить близько 0,073 кВт-год на кілометр порівняно з 0,127 кВт-год на кілометр для звичайного мотоцикла з двигуном внутрішнього згорання. Слід покращити транспортну відстань.
2015	Він та ін. [12]	одновинтовий розширювач	Найвищий загальний ККД становить 55 %, найбільший крутний момент становить майже 100 Н·м, найбільша вихідна потужність становить близько 22 кВт, а найменше споживання газу становить близько 60 кг/кВт-год.
2019	Чжан та ін. [13]	розширювач прокрутки	Максимальна масова витрата повітря 800 кг/год, максимальна потужність 8,112 кВт, максимальний ККД всього 0,26.
2023	Сю та ін. [14]	двоторний поршневій двигун	Максимальний вихідний момент становить 100 Н·м при 450 об/хв при тиску газу 0,6 МПа.

Закордонні джерела достатньо докладно описують дослідницькі проблеми в застосуванні енергетичних технологій стисненого повітря в силових приводах автотранспортних засобів. Але не усі питання, які стосуються оптимального використання технології стисненого повітря в автотранспортних засобах вирішені на сьогоднішній день

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Це дослідження має на меті представити комплексний огляд дослідницьких проблем і потенційних майбутніх стратегій розвитку застосування енергетичних технологій стисненого повітря в силових системах автотранспортних засобів. Ця стаття містить всебічне обговорення технології виробництва енергії на стисненому повітрі та підсумовує її можливе сучасне застосування в транспортному секторі, аналізує особливості конструктивного проектування, компонент і технічні нюанси гібридної технології стисненого повітря для застосування в автотранспортних засобах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Особливості конструкції двигунів на стисненому повітрі

У силовій системі зі стисненим повітрям енергія зазвичай перетворюється двигуном у механічну через розширення стисненого повітря в циліндрі. Поршнева структура схожа на структуру звичайного двигуна внутрішнього згоряння, за винятком того, що двигун, що працює на стисненому повітрі, не має паливного інжектора чи свічки запалювання. Робочий цикл двигуна складається з 2 тактів, відомих як розширення і вихлоп. Слід зазначити, що процес всмоктування відбувається на початку такту розширення. Впускний клапан зазвичай відкривається, коли поршень рухається до верхньої мертвої точки (ВМТ), і стиснене повітря надходить у циліндр з повітряного бака. Після закриття впускного клапана стиснене повітря, що потрапило в циліндр, продовжує розширюватися, поки поршень не досягне нижньої мертвої точки (НМТ). Випускний клапан відкривається після процесу розширення, і стиснене повітря викачується з циліндра рухом поршня вгору.

Об'ємні машини, такі як поршневі розширювачі, спіральні розширювачі та гвинтові розширювачі, популярні як агрегати для виробництва енергії. Однак поршковий розширювач має недоліки через низьку загальну ефективність, складну конструкцію та високий рівень шуму. Тому дослідники [15] прийняли та розробили одногвинтовий розширювач для потенційного вирішення вищезазначених проблем. Робочий процес одногвинтового розширювача (рис. 1) складався з трьох етапів: впуск повітря, розширення повітря та випуск повітря. Спочатку стиснене повітря на вході з певним тиском штовхало обертовий ротор, а шибєрний ротор обертався разом з ротором. Під час процесу розширення стиснене повітря розширювалося в закритому об'ємі, утвореному спіральною канавкою, зубом шибєрного ротора та корпусом під час обертання ротора.

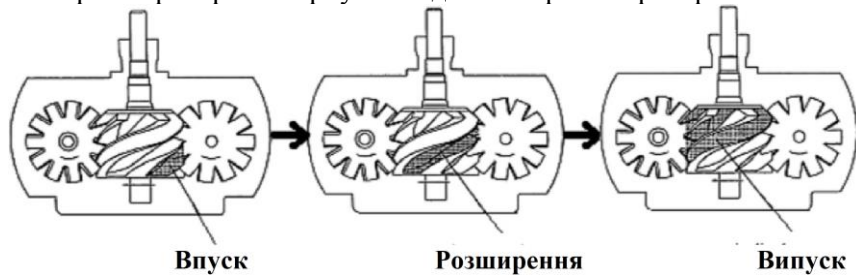


Рисунок 1. Процес роботи одногвинтового розширювача

Нові типи двигунів зі стисненим повітрям

В [16] було запропоновано новий тип двигуна зі стисненим повітрям на основі двороторного механізму. Результати показали, що попередньою перевагою двороторної конструкції було те, що вона дозволяла змінювати об'єм кожного циліндра чотири рази протягом одного оберту вихідного вала завдяки спеціальній системі приводу диференціальної швидкості. Таким чином, двороторний поршковий двигун був еквівалентним повітряному поршковому двигуну з 2 циліндрами однакового робочого об'єму. Результати моделювання показали, що максимальний крутний момент двороторного двигуна зі стисненим повітрям становив 100 Н·м при 450 об/хв під тиском впуску 0,6 МПа, що майже в три рази більше, ніж у поршневого двигуна з поршковим рухом.

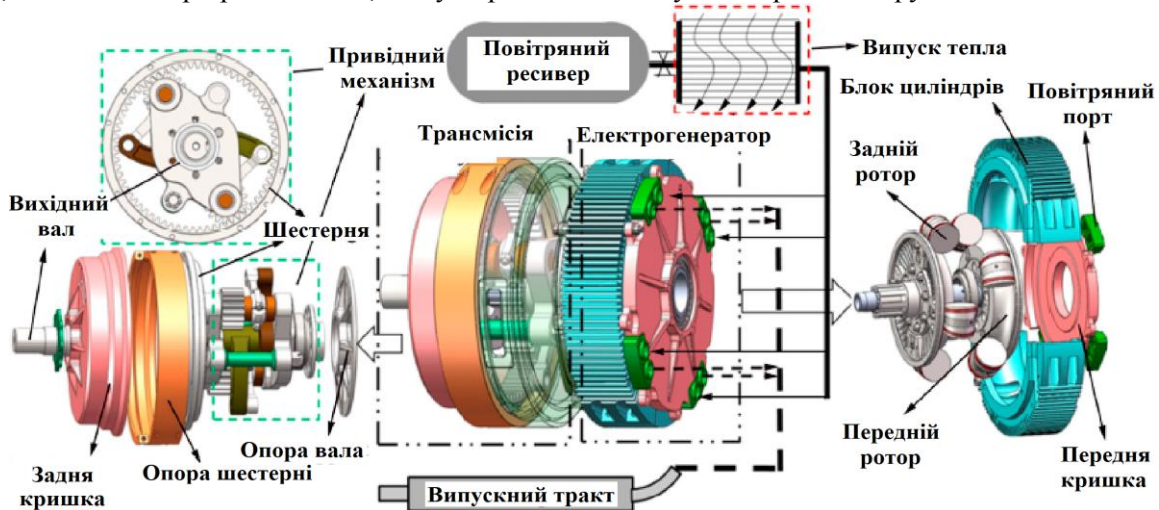


Рисунок 2. Схема двороторного повітряного двигуна

Автори [17] розробили клапанну систему з поліноміальним профілем кулачка та змоделювали вплив кута та максимального підйому клапана на коефіцієнт наповнення. Було зроблено висновок, що розроблений профіль кулачка повинен використовувати мінімальний підйом клапана для отримання максимального коефіцієнта наповнення. Дослідники [18] застосували ортогональну схему з аналізом Грея для оптимізації параметрів фаз газорозподілу двигуна, що працює на стисненому повітрі, і запропонували ідеальні значення кута підйому кулачка та кута повернення кулачка.

В [19] було розроблено електропневматичну систему змінного підйому клапана, що керується відпрацьованою енергією під час процесу зниження тиску стисненого повітря. Як показано на рис. 3, система складається з поршня, пневматичного циліндра, двох стандартних триходових електромагнітних клапанів, поршневих кілець і пружин. Перед операцією один з електромагнітних клапанів був налаштований на відкриття, а інший на закриття. Коли на електромагнітні клапани подавали напругу, керуюче повітря, що вироблялося під час процесу зниження тиску, надходило у камеру і штовхало поршень у одну сторону, утворюючи шлях потоку стисненого повітря від повітряного бака до циліндра двигуна. Коли обидва електромагнітні клапани були знеструмлені, керуюче повітря надходило в камеру, щоб штовхати поршень у другу сторону, таким чином перекриваючи подачу повітря в двигун.

Для перевірки гнучкості електропневматичної системи клапанів була створена ще одна експериментальна система [20]. Час газорозподілу клапанів можна регулювати, змінюючи час електричного імпульсу, що подається на електромагнітні клапани. Результати показали, що робоча частота клапанної системи досягає 30 Гц, що відповідає швидкості двигуна 2000 об/хв., майже охоплюючи весь діапазон швидкостей двигуна, що працює на стисненому повітрі.



Рисунок 3. Прототип двигуна зі стисненим повітрям та електромагнітною системою змінного підйому клапанів

Експериментальні дослідження двигунів зі стисненим повітрям

Експериментальні дослідження двигунів, що працюють на стисненому повітрі, забезпечують цінні практичні дані для підтвердження теоретичних досліджень системи та оптимізації стратегій керування двигунами. Більшість прототипів побудовані в дослідницьких модифікаціях звичайних ДВЗ.

Дослідники [21] з Національного університету Цин Хуа розробили прототип двигуна на стисненому повітрі, модифікованого на основі 100 см³ ДВЗ, який спочатку використовувався на мотоциклі. Для системи клапанів прототипу-повітряного двигуна, було збережено оригінальний кулачковий механізм ДВЗ. Профіль кулачка було модифіковано, щоб змінити роботу двигуна з 4-тактного на 2-тактний, причому максимальний підйом клапана зменшено з 5 мм до 2 мм. Експериментальні результати показали, що максимальна потужність досягається при тиску на вході 0,9 МПа, а швидкість потоку стисненого повітря змінюється від 500 л/хв. до 1050 л/хв., коли частота змінюється від 500 об/хв. до 2000 об/хв. Найвищий ККД, який спостерігався під час експериментів, склав 23 %, що, ймовірно, було викликано обмеженням клапанної системи на потоки впуску та випуску.

Для вирішення проблеми та оптимізації конструкції клапанної системи було запропоновано замінити оригінальний розподільний вал на поворотну систему впуску та випуску [22]. Нова система клапанів працювала при тиску повітря до 1,3 МПа, і тиск у робочому циліндрі зростав швидше, ніж у попередній системі зі звичайним кулачковим механізмом.

Прототип двигуна з новою роторною системою впуску та вихлопу видавав вихідну потужність 2,15 кВт і крутний момент 15,97 Нм при тиску на впуску 1,3 МПа. Його встановили на мотоцикл для проведення дорожніх випробувань [23]. Результати випробувань показали, що мотоцикл з двигуном на стисненому повітрі може рухатися на максимальній швидкості близько 60 км/год. протягом 5 км.

Поточний стан комерціалізації двигунів зі стисненим повітрям

Виробники автомобілів робили різні спроби розробки транспортних засобів на стисненому повітрі. Перший прототип автомобіля на стисненому повітрі під назвою AIRPod, показаний на рис. 4, був випущений компанією MDI в 1998 році. Пізніше MDI випустила серію прототипів, включаючи OneFlowAir, CityFlowAir, MiniFlowAir і MultiFlowAir.



Рисунок 4. Транспортний засіб зі стисненим повітрям AirPod

Tata Motors з Індії є ще одним виробником автомобілів, що працює над транспортними засобами із двигунами на стисненому повітрі. У 2009 році компанія Tata планувала випустити автомобіль з пневматичним приводом із двигуном на стисненому повітрі. У лютому 2017 року Тім Левертон, президент і голова відділу вдосконаленої техніки Tata Motors оголосив про комерціалізацію концепції та випуск першого автомобіля [24]. Tata також розглядає плани відродження версії Tata Nano зі стисненим повітрям, яка раніше розглядалася в рамках їхньої співпраці з MDI [25].

Крім MDI і Tata Motors, були й інші компанії, які працювали над двигуном на стисненому повітрі. Наприклад, компанія EngineAir з Австралії розробила роторний повітряний двигун під назвою «мотор Di Pietro» (див. рис. 5) на основі обертового поршня [26]. На відміну від існуючих роторних двигунів, двигун Di Pietro використовує простий циліндричний обертовий поршень (привідний вал), який котиться всередині циліндричного статора.



Рисунок 5. Транспортний засіб на стисненому повітрі EngineAir

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таким чином, починаючи з 1990-х років було проведено кілька досліджень двигунів, що працюють на стисненому повітрі, що призвело до випуску різних прототипів двигунів і транспортних засобів. Однак застосування двигунів на стисненому повітрі в транспортних засобах не настільки популярне порівняно з іншими технологіями альтернативної енергії, такими як електромобілі. Кілька технологічних причин підсумовані нижче. Високі втрати енергії стисненого повітря під час роботи є головним технічним бар'єром. Через низьку щільність енергії необхідно збільшити тиск зберігання стисненого повітря, що може призвести до серйозних втрат стисненого повітря відносно дросельної заслінки, коли повітря випускається з повітряного бака. Під час робочого процесу двигуна, що працює на стисненому повітрі, тиск у циліндрі вищий, ніж після розширення стисненого повітря, що означає, що енергія стисненого повітря недостатньо перетворюється на вихідну потужність. Крім того, стиснене повітря може зазнавати великих втрат потоку під час процесу всмоктування через високу швидкість потоку та конструкцію системи клапанів. Процес дроселювання стисненого повітря створює низьку температуру в певних місцях труб або клапанів відповідно до ефекту Джоуля-Томсона, що може призвести до проблем блокування льодом двигуна після тривалої роботи.

Разом з тим трансмісія, що працює на стисненому повітрі, демонструє унікальну перевагу завдяки своїй екологічності, оскільки повітря є єдиним викидом. Однак застосування двигуна, що працює на стисненому повітрі, обмежене через низьку ефективність. Трансмісія, що працює на стисненому повітрі, може бути більш придатною для використання в якості допоміжної силової системи в гібридній силовій установці. Така гібридна система на стисненому повітрі може бути реалізована на транспортному засобі шляхом поєднання двох незалежних типів силової підсистеми, включаючи двигун зі стисненим повітрям і звичайний ДВЗ.

Протягом останніх кількох десятиліть повідомлялося про численні дослідження різних типів гібридних систем стисненого повітря. Наприклад, прототип «гібридного автомобіля на стисненому повітрі», розроблений компанією PSA Peugeot Citroen, був продемонстрований на Женевському автосалоні в 2013 році [27]. PSA стверджувала, що ця технологія має такий же вплив на економію палива, як і гібридна електрика, з меншою складністю в системі розташування та меншою вартістю. Ця технологія не єдина спроба використовувати стиснене повітря як альтернативне джерело енергії для руху транспортних засобів, про що буде докладніше пояснено в наступних розділах.

Принцип рекуперативного гальмування полягає у відновленні зайвої кінетичної енергії транспортного засобу під час фази гальмування та перетворенні в доступну енергію, таку як заряд акумулятора [28]. Подібним чином рекуперативне гальмування можна використовувати для виробництва стисненого повітря в гібридній системі повітря. Основна відмінність полягає в тому, що енергія акумулятора відновлюється в процесі заряджання на основі хімічної реакції, тоді як стиснене повітря виробляється в процесі стиснення компресора. Порівняно з гібридною електричною силовою установкою, гібридна система зі стисненим повітрям є більш компактною, оскільки стиснення та вихідна потужність можуть бути реалізовані на одному двигуні.

Дослідники в [29] представили новий термодинамічний цикл, який міг би забезпечити суттєве покращення економії автомобільного палива. Новий цикл міг реалізувати перетворення кінетичної енергії автомобіля в стиснене повітря. Перероблене стиснене повітря зберігалося в повітряному резервуарі та використовувалося для прискорення автомобіля. Процес гальмування транспортного засобу було замінено компресійним гальмуванням, під час якого впорскування палива двигуном припинялося, а двигун працював як поршневий двотактний компресор, що приводився в рух від ведучих коліс транспортним засобом. Повітря вводилося із зовнішньої атмосфери в циліндр, стискалося і витіснялося в повітряний резервуар. Робота, яку виконує поршень, поглинає кінетичну енергію транспортного засобу та реалізує гальмування, таким чином перетворюючи кінетичну енергію транспортного засобу в стиснене повітря. Двигун може бути повністю зупинений протягом часу зупинки. Під час прискорення двигун міг працювати і як пневматичний двигун, і як двигун внутрішнього згоряння в чотиритактному циклі з пневматичною підтримкою. Під час роботи в циклі живлення з підтримкою повітря стиснене повітря вводилося в циліндр двигуна, розширювалося та виконувало роботу під час першого ходу поршня вниз. Потім цей же заряд повітря використовувався в наступному процесі згоряння, виконуючи додаткову роботу над поршнем під час його другого ходу вниз. Двигун також міг працювати як двотактний пневматичний двигун, деактивувавши впорскування палива та вводячи стиснене повітря в циліндр для розширення та збільшення продуктивності.

Шехтер в [30] запропонував і виконав модифікації двигуна для реалізації нового циклу. Як показано на рис. 6, до кожного циліндра було додано додатковий зарядний клапан, який був з'єднаний із зарядним колектором і повітряним баком. У системі клапанів були рекомендовані електронні та змінні стратегії керування. Результати моделювання показали, що зниження споживання палива на 50 % може бути досягнуто за допомогою гібридного двигуна зі стисненим повітрям у міському циклі водіння, а ефективність перетворення та рекуперації енергії «туди й назад» оцінюється в 60–65 % [31]. Однак варто зазначити, що ефективність переміщення в обидві сторони значною мірою залежить від тиску повітря, що зберігається. Відносно високий загальний ККД може бути досягнутий лише тоді, коли накопичене повітря знаходиться в області низького тиску (нижче 5 бар). Коли збережене стиснене повітря працює в області високого тиску, більша частина механічної енергії буде втрачена у вигляді тепла під час процесу стиснення [32]. Тому необхідно розробити технологію зберігання теплової енергії для забезпечення високопродуктивної енергетичної системи стисненого повітря.

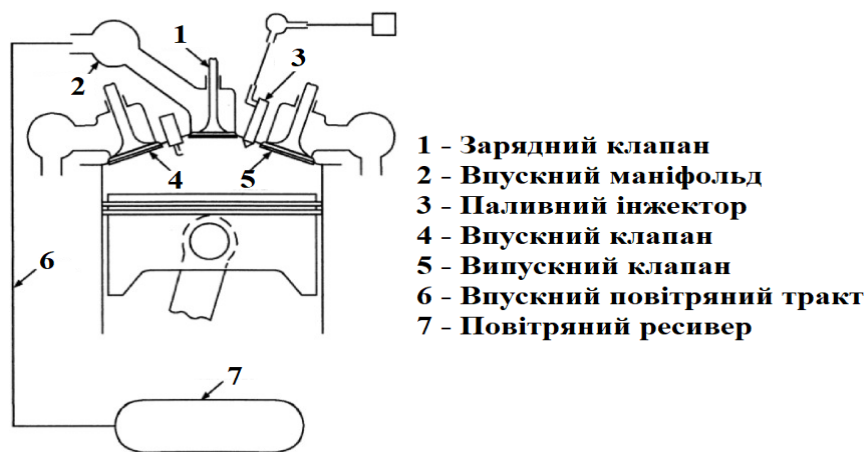


Рисунок 6. Схема гібридного двигуна на стисненому повітрі

На основі експериментальних результатів автори [33] провели дослідження моделювання гібридної системи стисненого повітря за допомогою програмного забезпечення GT-Power. Результати показали, що для пневматичного гібридного автобуса в Брауншвейзькому робочому циклі можна досягти зниження економії палива приблизно на 30 %. Відповідно основна частина зниження споживання палива була забезпечена функцією зупинки/старту системи, тоді як рекуперативне гальмування знизило витрату лише 8,4 % [34]. Крім того, близько 87 % гальмівної потужності може бути поглинене та перетворено на стиснене повітря, однак лише 20 % цієї частини енергії може бути перетворено на ефективну роботу [35].

Пізніше випробування емуляції транспортного засобу були проведені на двох серійних легкових автомобілях компактного класу: Volkswagen Polo та Nissan Micra [36]. Обидва транспортні засоби були оснащені двигунами, які демонстрували приблизно таку ж номінальну потужність, як і MPE750. Результати експерименту показали, що витрата палива тестових автомобілів може бути зменшена на 35 % і 30 % за циклом MVEG-95 і FTP відповідно [37].

Voser та ін. [38] додатково вивчали наддув стисненим повітрям у циліндри двигуна з іскровим запалюванням із наддувом. Стратегія керування крутним моментом, заснована на дезактивованій системі клапанів із приводом від розподільного вала, була розроблена для компенсації турбозатримки під час перехідних умов, а пізніше була експериментально перевірена на кількох швидкостях двигуна та для різних ступенів крутного моменту [39].

Лі та ін. [40] досліджували економічно ефективну концепцію гібридного двигуна зі стисненим повітрям для автобусів і комерційних транспортних засобів. Як і в дослідженнях, описаних вище, стиснене повітря було перетворено в процесі гальмування транспортного засобу та могло використовуватися для приводу пневматичного стартера та досягнення рекуперативного гальмування для автобусів і транспортних засобів доставки з частими операціями «стоп-старт» [41].

Рекуперативне гальмування стисненим повітрям, в основному, застосовувалося до дизельних двигунів [42]. Це можна пояснити тим фактом, що і дизельний двигун, і двигун на стисненому повітрі працюють на відносно низькій швидкості. Слід також зазначити, що більшість досліджень базуються

на моделюванні, а не на експериментах, причому за останні роки було повідомлено про декілька прототипів гібридного двигуна на стисненому повітрі [43].

Утилізація енергії тепла

Відпрацьоване тепло, що утворюється під час згоряння палива традиційного двигуна, займає приблизно 60-65 % загальної енергії палива у формі охолоджувальної рідини двигуна та вихлопної енергії [44], демонструючи великий потенціал у рекуперації відпрацьованого тепла.

Zhai [45] запропонував гібридну систему стисненого повітря для відновлення відпрацьованого тепла від звичайного двигуна з метою підвищення ефективності двигуна на стисненому повітрі. Звичайний двигун і двигун на стисненому повітрі працювали в системі окремо. Гібридні форми були змодельовані за допомогою засобів моделювання, включаючи послідовний, паралельний і змішаний режими.

Ху та ін. [46] та Nie [47] продовжили дослідження Zhai, моделюючи гібридну систему стисненого повітря на основі окремої рекуперації тепла вихлопних газів і охолоджуючої рідини, довівши, що продуктивність і ефективність двигуна на стисненому повітрі можна покращити шляхом рекуперації відпрацьованого тепла від звичайного ДВЗ.

Автори [48] оцінили потенціал енергозбереження гібридної системи зі стисненим повітрям, моделюючи систему охолодження 4-циліндрового дизельного двигуна і дійшли висновку, що застосування пневматичної гібридизації може заощадити 50 % потужності вентилятора охолодження, оскільки відпрацьоване тепло, що міститься в охолоджувальній рідині, рекуперується стисненим повітрям.

Сумування енергії, що з'єднує вихлопну трубу двигуна та вихід повітряного компресора, також було вивчено за допомогою CFD моделювання та експериментів [49] (рис. 7). Було зроблено висновок, що на процес злиття енергії суттєво впливає площа поперечного перерізу з'єднувальної труби. І близько 80 % відпрацьованого тепла вихлопних газів може бути рекуперовано під оптимізованою площею поперечного перерізу [50]. Гібридна система була оцінена та продемонстрована в експерименті, який має потенціал для підвищення ефективності транспортного засобу приблизно до 40%, коли тиск стисненого повітря стабільний на рівні 8 бар [51].

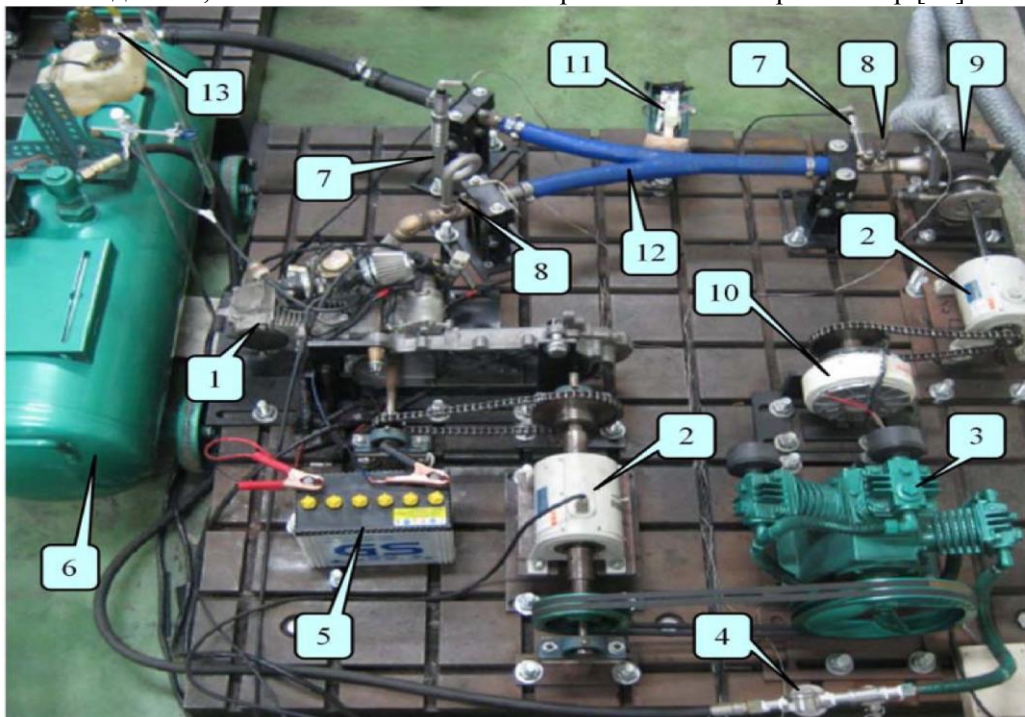


Рисунок 7. Гібридна пневматична енергетична система: 1 - Бензиновий двигун; 2 - Датчик крутного моменту; 3 - Повітряний компресор; 4 - Клапан стабілізатора напруги; 5 - Акумулятор; 6 - Бак для зберігання повітря; 7 - Датчик тиску; 8 - Датчик температури; 9 - Турбіна; 10 - Тензодатчик; 11 - Електричний двигун; 12 - Колектор; 13 - Регулюючий клапан.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Порівняно з трансмісією зі стисненим двигуном, гібридна трансмісія зі стисненим повітрям об'єднує двигун зі стисненим повітрям і звичайний ДВЗ шляхом модифікації традиційної системи

ДВЗ для пневматичної гібридизації. Впорскування палива призупиняється під час фази гальмування, а впуск двигуна в повітряний резервуар здійснюється через додатковий зарядний клапан, розміщений на головці блоку циліндрів. Стиснене повітря може використовуватися для приводу двигуна під час фази запуску або прискорення. Таке пневматичне рекуперативне гальмування є ключем до пневматичної гібридизації, оскільки воно є єдиним джерелом енергії під час роботи гібридного двигуна зі стисненим повітрям.

Пряме розширення є основним методом перетворення енергії для стисненого повітря, відновленого під час фази гальмування. Поточні дослідження були зосереджені на оцінці ефекту пневматичної гібридизації на зниження споживання палива, тоді як кілька дослідників розглядали оптимізацію продуктивності, під час періоду роботи стисненим повітрям, шляхом рекуперації відпрацьованого тепла від звичайного ДВЗ. Крім того, потік стисненого повітря може використовуватися для контролю фази згоряння попередньо змішаної паливно-повітряної суміші. Проблема низької ефективності розширення стисненого повітря потенційно можна усунути за допомогою інноваційного запалювання від стиснення, керованого струменем стисненого повітря.

У таблиці 2 підсумовано характеристики різних гібридних силових агрегатів зі стисненим повітрям, про які йшлося раніше. Можна зробити висновок, що рекуперативне гальмування на основі стисненого повітря повинно стати важливим елементом гібридної силової установки зі стисненим повітрям, тоді як методи використання енергії стисненого повітря можна комбінувати або вибирати відповідно до різних умов.

Таблиця 2 – Порівняння різних гібридних силових агрегатів зі стисненим повітрям

Тип гібридних силових агрегатів зі стисненим повітрям	Переваги	Недоліки
Рекуперативне гальмування на основі стисненого повітря	Стиснене повітря може вироблятися під час гальмування автомобіля, без додаткових вимог до повітряних компресорів.	Споживання палива автомобіля можна зменшити. Ефективність двигуна в режимі стисненого повітря все ще нижча за 20%.
Гібридна система, заснована на рекуперації відпрацьованого тепла	Ефективність у режимі роботи стисненим повітрям можна підвищити шляхом рекуперації відпрацьованого тепла від звичайного двигуна.	Звичайний двигун може працювати в стабільних умовах, щоб зменшити споживання палива та викиди забруднюючих речовин. Джерело стисненого повітря залишається невирішеним, може знадобитися компресор з двигуном. Складність системи збільшується, оскільки звичайний двигун і двигун на стисненому повітрі розділені.
Компресійне запалювання з регульованим струменем стисненого повітря	Стиснене повітря не бере участі в прямій видачі електроенергії, що усуває проблеми з низьким ККД.	Ефект від компресійного запалювання струменя стисненого повітря потребує додаткової перевірки, оскільки поточні дослідження обмежуються моделюванням.

Аналіз викидів парникових газів «від свердловини до колеса», проведений в роботі [52] показав, що загальне споживання енергії та викиди парникових газів для електромобілів були на 20 % вищими, ніж для звичайного автомобіля з ДВЗ. Крім того, роль ДВЗ залишається непохитною для великовантажних комерційних автомобілів, до яких, беззаперечно, відноситься і нафтогазовий технологічний транспорт. З огляду на практичне застосування транспортних засобів, таких як важкі вантажівки, використання батареї як єдиного джерела живлення взагалі неможливе, оскільки велика вага акумуляторів різко зменшить смість вантажу. Повна заміна автомобілів з ДВЗ на електромобілі не настільки здійсненна, якщо тільки в найближчі десятиліття не відбудеться кардинального технологічного розвитку акумуляторів. Тому, як енергозберігаюча та екологічно чиста технологія, гібридна трансмісія зі стисненим повітрям має свою потенційну цінність на важкому транспорті, до якого, поза сумнівом, відноситься і нафтогазовий технологічний транспорт. Надійність повітряного резервуара може бути досягнута завдяки прогресу в розробці матеріалів резервуарів для зберігання.

Ряд компаній розробляють нові матеріали, такі як композит з вуглецевого волокна для зберігання водню під високим тиском, і тиск зберігання може досягати 80 МПа [53].

ВИСНОВКИ

Розглянуто та узагальнено сучасний стан енергетичних систем стисненого повітря та їх потенційне застосування для автомобільного транспорту. Використовуючи пневматичне рекуперативне гальмування енергію, розсіювану під час фази гальмування автомобіля, можна відновити та зберегти енергію у вигляді стисненого повітря та перетворити її на механічну потужність під час прискорення автомобіля. Водночас джерело стисненого повітря може бути забезпечене під час процесу старт-стоп автомобіля. Використання стисненого повітря для рекуперації відпрацьованого тепла від звичайного двигуна внутрішнього згоряння є ще одним методом гібридизації, який може покращити продуктивність системи двигуна, коли він працює виключно зі стисненим повітрям. Коли використовується технологія горіння, керована струменем стисненого повітря, низька ефективність пневматичного двигуна усувається, оскільки стиснене повітря не розширюється для механічної роботи. Цей інноваційний процес спалювання також можна розглядати як рішення для гібридизації стисненого повітря.

Отримані дані та результати показали, що силову установку виключно на стисненому повітрі важко досягти для застосування в легковому транспортному засобі, незважаючи на її унікальну перевагу в екологічній вигоді. Технічні недоліки, включаючи низьку ефективність і низьку щільність енергії двигунів на стисненому повітрі, все ще вимагають великих дослідницьких зусиль для просування технологічних розробок в легковому транспортному засобі. Гібридний двигун на стисненому повітрі, який поєднує двигун на стисненому повітрі зі звичайним двигуном внутрішнього згоряння, може бути потенційним методом на важкому вантажному транспорті та автобусах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.S. Robertson, A Brief History of Air Cars, 2015.
- 2.B. Habbie, Improvement in Compressed-Air Engines, Google Patents, 1879.
- 3.E. Bowers, Evolution of the Air-Compressed Car, 2013.
- 4.H. Liu, Y. Chen, G.L. Tao, G.Z. Jia, W.H. Ding, Research on the displacement and stroke-bore ratio of the air-powered engine, in: Proceedings of International Conference on Fluid Power Transmission and Control, 2005, pp. 381–384.
- 5.Y. Chen, H. Liu, G.L. Tao, Simulation on the port timing of an air-powered engine, Int. J. Vehicle Des. 38 (2005) 259–273.
- 6.X. Yu, G. Yuan, Y. Shen, Z. Liu, S. Su, Theoretical analysis of air powered engine work cycle, Jixie Gongcheng Xuebao/Chin. J. Mech. Eng. 38 (2002) 118–122.
- 7.L. Liu, X.-L. Yu, Optimal design of ideal cycle in air powered engine, Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.) 40 (2006). 1815–1818.
- 8.J.-Q. Hu, X.-L. Yu, L. Liu, X.-H. Nie, Dynamic characteristics of in-cylinder flow field in air-powered engine, Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.) 41 (2007) 1912–1915.
- 9.Q. Xu, M. Cai, Y. Shi, Dynamic heat transfer model for temperature drop analysis and heat exchange system design of the air-powered engine system, Energy 68. (2014) 877–885.
- 10.Y. Shi, J.P. Sun, M.L. Cai, Q.Y. Xu, Study on the temperature compensation technology of air-powered engine, J. Renew. Sustain. Energy 7 (2015).
- 11.Y.-T. Shen, Y.-R. Hwang, Design and implementation of an air-powered motorcycles, Appl. Energy 86 (2009) 1105–1110.
- 12.W. He, Y. Wu, C. Ma, G. Ma, Performance study on three-stage power system of compressed air vehicle based on single-screw expander, Sci. China Technol. Sci. 53 (2015) 2299–2303.
- 13.C.S. Zhang, S.S. Xiong, X.S. Ren, W. Li, Experimental study on output characteristics of scroll expander used as air powered vehicle engine, Electric. Power Energy Syst., Pts 1 and 2 (2019) 516–517.
- 14.H.J. Xu, L. Zhang, C.Y. Pan, X. Zhang, Design and dynamic characteristic prediction of air-powered twin-rotor piston engine, J. Cent. South Univ. 22. (2023) 4585–4596.
- 15.W. He, Y. Wu, Y. Peng, Y. Zhang, C. Ma, G. Ma, Influence of intake pressure on the performance of single screw expander working with compressed air, Appl. Therm. Eng. 51 (2013) 662–669.
- 16.G. Jia, X. Wang, G. Wu, Study on ultrahigh pressure and large flow rate pneumatic on-off valve, Jixie Gongcheng Xuebao/Chin. J. Mech. Eng. 40 (2004). 77–81.

- 17.Z. Zhang, R.B. Jia, Q.H. Yu, M.L. Cai, Study on design criteria and methods for the valve train of the compressed-air engine, *Adv. Mechatron. Contr. Eng., Pts 1-3.* (2013) 278–280.
- 18.Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, C. Yuan, Dimensionless study on efficiency and speed characteristics of a compressed air engine, *J. Energy Resour. ASME* 137 (2015).
- 19.P.L. Chen, X.L. Yu, L. Liu, Simulation and experimental study of electropneumatic valve used in air-powered engine, *J. Zhejiang Univ. - Sci. A* 10 (2009). 377–383.
- 20.A. Koca, R. Bayindir, H. Gunes, M.A. Kunt, S. Sakar, Design and application of electromagnetic solenoid for valve mechanism on compressed air engines, *J. Fac. Eng. Archit. Gaz.* 26 (2011) 73–79.
- 21.C.-Y. Huang, C.-K. Hu, C.-J. Yu, C.-K. Sung, Experimental investigation on the performance of a compressed-air driven piston engine, *Energies* 6 (2013). 1731–1745.
- 22.C.M. Liu, J.J. You, C.K. Sung, C.Y. Huang, Modified intake and exhaust system for piston-type compressed air engines, *Energy* 90 (2015) 516–524.
- 23.Y.W. Wang, J.J. You, C.K. Sung, C.Y. Huang, The applications of piston type compressed air engines on motor vehicles, *Procedia Engineer* 79 (2014) 61–65.
- 24.S.B. Barooah, Tata Motors' Air-Powered Car Project Still on, to Be Launch Ready in 3 Years, 2017.
- 25.I.A. Blog, Tata Nano Could Spawn Electric, Hybrid & Air-Powered Variants-Report, 2017.
- 26.H. Liu, G. Tao, Study on air charging process of quick recharge station for air powered vehicle, *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mech. Eng.* 18 (2007). 369–373.
- 27.Y. Shi, Y.X. Wang, H.W. Liang, M.L. Cai, Power characteristics of a new kind of air-powered vehicle, *Int. J. Energy Res.* 40 (2016) 1112–1121.
- 28.Y.-D. Fang, D.-F. Li, Y. Yang, X.-L. Yu, Analysis of intake flow loss in pneumatic engine, *Neiranji Gongcheng/Chin. Internal Combust. Engine Eng.* 34 (2013). 88–92.
- 29.M.M. Schechter, Operating a Vehicle with Braking Energy Recovery, United States Patents, 2007.
- 30.M.M. Schechter, Vehicle Operating Method and System, United States Patents, 2001.
- 31.M.M. Schechter, New Cycles for Automobile Engines, SAE International, 1999.
- 32.M.M. Schechter, Regenerative compression braking - a low cost alternative to electric hybrids, *SAE Int.* (2000).
- 33.S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson, A study on compression braking as a means for brake energy recovery for pneumatic hybrid powertrains, *Int. J. Powertrains* 2 (2013) 26–51.
- 34.S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson, A simulation study quantifying the effects of drive cycle characteristics on the performance of a pneumatic hybrid bus, in: *ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, 2010*, pp. 605–618.
- 35.S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson, Vehicle driving cycle simulation of a pneumatic hybrid bus based on experimental engine measurements, *Sae Techn. Pap.* (2010) 2010–2011.
- 36.S. Trajkovic, *The Pneumatic Hybrid Vehicle - A New Concept for Fuel Consumption Reduction [Doctoral Thesis]*, Lund University, Sweden, 2010.
- 37.C. Voser, T. Ott, C. Donitz, C. Onder, L. Guzzella, In-cylinder boosting of turbocharged spark-ignited engines. Part 2: control and experimental verification, *Proc. Int. Mech. Eng. D-J. Aut.* 226 (2012) 1564–1574.
- 38.C. Voser, C. Donitz, G. Ochsner, C. Onder, L. Guzzella, In-cylinder boosting of turbocharged spark-ignited engines. Part 1: model-based design of the charge valve, *Proc. Int. Mech. Eng. D-J. Aut.* 226 (2012) 1408–1418.
- 39.C.-Y. Lee, H. Zhao, T. Ma, Analysis of a novel mild air hybrid engine technology, RegenEBD, for buses and commercial vehicles, *Int. J. Engine Res.* 13 (2012). 274–286.
- 40.C.-Y. Lee, H. Zhao, T. Ma, A simple and efficient mild air hybrid engine concept and its performance analysis, *Proc. Inst. Mech. Eng. - Part D J. Automob. Eng.* 227. (2012) 120–136.
- 41.C.-Y. Lee, H. Zhao, T. Ma, Pneumatic regenerative engine braking technology for buses and commercial vehicles, *SAE Int. J. Engines* 4 (2011) 2687–2698.
- 42.C.Y. Lee, H. Zhao, T. Ma, A low cost air hybrid concept, *Oil Gas Sci. Technol. – Revue de l'Institut Français du Pétrole.* 65 (2010) 19–26.
- 43.T.T.H. Ma, H. Zhao, Method of Operating an Internal Combustion Engine, Google Patents, 2008.
- 44.Y. Lu, A.P. Roskilly, X. Yu, K. Tang, L. Jiang, A. Smallbone, et al., Parametric study for small scale engine coolant and exhaust heat recovery system using different Organic Rankine cycle layouts, *Appl. Therm. Eng.* 127 (2017) 1252–1266.

- 45.Y. Lu, Y. Wang, C. Dong, L. Wang, A.P. Roskilly, Design and assessment on a novel integrated system for power and refrigeration using waste heat from diesel engine, *Appl. Therm. Eng.* 91 (2015) 591–599.
- 46.J.-Q. Hu, X.-L. Yu, X.-H. Nie, P.-L. Chen, Feasibility of parallel air-powered and diesel hybrid engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 43 (2009) 1632–1637.
- 47.X.-H. Nie, X.-L. Yu, Y.-D. Fang, P.-L. Chen, Experiment research on pneumatic diesel hybrid engine based on cooling water energy recovery, *Neiranji Gongcheng/Chin. Internal Combust. Engine Eng.* 31 (2010) 58–62.
- 48.Y. Fang, D. Li, Z. Fan, H. Xu, L. Wang, X. Yu, Study on pneumatic-fuel hybrid system based on waste heat recovery from cooling water of internal combustion engine, *Sci. China Technol. Sci.* 56 (2013) 3070–3080.
- 49.K.D. Huang, V.Q. Khong, Energy merger pipe optimization of hybrid pneumatic power system by using CFD, *Int. J. Green Energy* 7 (2010) 310–325.
- 50.K.D. Huang, K.V. Quang, K.T. Tseng, Experimental study of flow energy merger of hybrid pneumatic power system, in: 2008 Ieee International Conference on Sustainable Energy Technologies (Icset), Vols 1 and 2, 2008, 1151.
- 51.K.D. Huang, K.V. Quang, K.T. Tseng, Study of recycling exhaust gas energy of hybrid pneumatic power system with CFD, *Energy Convers. Manag.* 50 (2009). 1271–1278.
- 52.J. Woo, H. Choi, J. Ahn, Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: a global perspective, *Transport. Res. Transport Environ.* 51 (2017) 340–350.
- 53.D.A. Carbot-Rojas, R.F. Escobar-Jiménez, J.F. Gómez-Aguilar, A.C. Téllez-Anguiano, A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73 (2017). 1070–1085.

S. Kryshchopa, L. Kryshchopa, A. Dobush, O. Mysiv, R. Matvienko, D. Kopyltsiv. Review of the application of air power systems in transport

The possibilities of using compressed air-based energy systems in power drives of motor vehicles are analyzed. The advantages and limitations of pneumatic systems compared to traditional hydraulic and electromechanical drives are analyzed. The main technical parameters that affect the efficiency of such systems are determined, in particular the level of energy consumption, energy losses and reliability of operation under increased loads. The prospects for implementing modern technologies for accumulating and regulating compressed air to increase the productivity and environmental safety of equipment are considered. Ways of optimizing systems are proposed that will contribute to reducing operating costs and increasing the energy efficiency of vehicles. It is established that compressed air-based energy systems can be used as the main source of power without emissions or as an auxiliary power unit in motor vehicles, ensuring zero carbon emissions and improved overall energy efficiency of integrated design solutions. The article presents a detailed technological development of compressed air-based power systems, summarizes the research on power units operating on this technology in the transport sector. Special attention is paid to the development of new technologies, prototyping and integration of pneumatic systems. In addition, hybrid technologies based on compressed air, which use various methods of pneumatic hybridization, are considered in detail, which allows better use of their advantages and limitations. The prospects and challenges of implementing compressed air-based technologies in power drives of road transport are discussed. It is expected that the modernization of power systems in this sector will contribute to technological development and the implementation of environmentally friendly solutions without emissions in transport.

Keywords: road transport, air technologies, pneumatic systems, compressed air, hybrid power drives, energy efficiency

КРИШТОПА Святослав Ігорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: auto.ifntung@ukr.net, ORCID 0000-0001-7899-8817,

КРИШТОПА Людмила Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент каф. автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: l.i.kryshchopa@gmail.com, ORCID 0000-0002-5274-0217,

ДОБУШ Андрій Ігорович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: trans@nung.edu.ua, ORCID: немає

МИСІВ Олег Олегович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національній технічній університет нафти і газу, e-mail: trans@nung.edu.ua, ORCID: немає

МАТВІЄНКО Роман Михайлович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національній технічній університет нафти і газу, e-mail: trans@nung.edu.ua, ORCID: немає

КОПИЛЬЦІВ Дмитро Васильович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національній технічній університет нафти і газу, e-mail: trans@nung.edu.ua, ORCID: немає

Sviatoslav KRYSTOPA, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: auto.ifntung@ukr.net, ORCID 0000-0001-7899-8817,

Lyudmila KRYSTOPA, Ph.D., Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: l.i.kryshtopa@gmail.com, ORCID 0000-0002-5274-0217,

Andriy DOBUSH, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: trans@nung.edu.ua,

Oleg MYSIV, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: trans@nung.edu.ua,

Roman MATVIENKO, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: trans@nung.edu.ua,

Dmytro KOPYLTIV, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: trans@nung.edu.ua

DOI 10.36910/automash.v1i24.1730

Куць Н.Г., Булік Ю.В., Дубицький О.С., Мазилук П.В.
*Луцький національний технічний університет***РАДІОТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА АВТОМОБІЛЯ**

В цій статті проведено короткий аналіз наукового напрямку «Радіотехнічна діагностика автомобіля». Радіотехнічна діагностика автомобіля - це метод технічного контролю стану автомобільних систем і вузлів, який базується на використанні радіохвиль (радіосигналів) для виявлення несправностей, дефектів або змін фізичних властивостей матеріалів без їх розбирання або демонтажу. Робочі теплові та електричні двигуни є джерелами інтенсивного електромагнітного випромінювання в радіодіапазоні. Це випромінювання модулюється за частотою та амплітудою як внутрішніми процесами формування радіовипромінювання, так і зовнішніми впливами. Використовуючи інтегральну, спектральну та кореляційну обробку складного радіосигналу, можна визначити основні параметри роботи двигунів, величину внутрішніх фрикційних зв'язків та характер зовнішнього впливу на рухомий транспортний засіб. Це дозволяє оцінити можливість подальшого використання транспортного засобу та здійснити його оптимальне управління.

Ключові слова: транспорт, двигун, радіовипромінювання, технічна діагностика, радіосигнал.

ВСТУП

Під час радіотехнічної діагностики за допомогою спеціальних пристроїв реєструють та аналізують відбиття, поглинання або випромінювання радіохвиль автомобільними елементами, щоб визначити їхній технічний стан. Зокрема, це може застосовуватися для діагностики металевих конструкцій (кузова, рами) на наявність корозії чи тріщин; електронних систем (радіолокаційне випромінювання для контролю роботи сенсорів, антен, систем допомоги водію); прихованих дефектів в обшивці або у внутрішніх порожнинах автомобіля.

Переваги радіотехнічної діагностики автомобіля полягають в безконтактності, високій точності, швидкості обстеження, безпечності, універсальності, доступу до важкодоступних зон. При радіотехнічній діагностиці транспортного засобу немає потреби розбирати або дефектувати деталі автомобіля, а дозволяє виявляти дрібні дефекти або зміни на ранніх стадіях затрачаючи значно менше часу, ніж традиційна діагностика [1]. Радіохвилі не шкодять матеріалам і не впливають на електроніку та підходить для діагностики металевих, пластикових і композитних елементів, обстежуючи внутрішні порожнини без розбирання. Обладнання та методи радіотехнічної діагностики використовують короткі імпульси радіохвиль для "просвічування" конструкцій автомобіля, що дозволяє виявляти тріщини, корозію під фарбою, приховані пошкодження; радіохвильові дефектоскопи працюють у мікрохвильовому діапазоні та використовуються для перевірки цілісності матеріалів кузова, особливо після аварій чи ремонту. Системи неруйнівного контролю на основі радіолокації працюють як маленькі радары: передають сигнал і аналізують його відбиття, виявляючи неоднорідності в шарах лакофарбового покриття, шпаклівки чи металу.

Радіометричні прилади вимірюють власне радіовипромінювання матеріалів і можуть оцінювати стан електронних систем, кабельних з'єднань, сенсорів. Інспекційні системи на основі Wi-Fi/5G-частот використовують зміну характеристик сигналу при проходженні через матеріали, визначаючи рівень вологості або мікро тріщини.

На практиці найчастіше застосовують такі методи для діагностики батарей електромобілів. Радіохвилі, проходячи через корпус батареї, відбиваються від внутрішніх елементів і аналізують відбитий сигнал, що можна визначити неоднорідності, дефекти, мікропошкодження або зміни в структурі осередків батареї без розбирання. Можна діагностувати перегрів або локальне підгоряння елементів, появу вологості або конденсату всередині батарейного модуля, розшарування чи механічні пошкодження осередків, втрату контактів або з'єднань всередині батареї, здуття окремих елементів, що призводить до зниження ємності або ризику займання.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМ

Радіотехнічна діагностика автомобіля є одним з новітніх напрямків у галузі автомобільної техніки, який ґрунтується на використанні радіохвиль та електромагнітного випромінювання для оцінки стану технічних вузлів транспортного засобу. Цей метод дозволяє безконтактно та ефективно отримувати інформацію про стан роботи двигунів, систем трансмісії, роботи електричної батареї, а також виявляти можливі неполадки, що виникають в реальному часі під час експлуатації автомобіля.

В рамках радіотехнічної діагностики автомобіля важливими аспектами є аналіз радіошуму, випромінюваного окремими вузлами та агрегатами транспортного засобу. За допомогою спеціальних

апаратних комплексів, що здатні вимірювати інтегральну потужність радіошуму та ідентифікувати характерні модуляції, можна визначити наявність внутрішніх дефектів та зовнішніх впливів на технічний стан автомобіля [2]. Ось деякі приклади обладнання для ранньої діагностики: мікрохвильові сканери спеціально для батарей; UWB-радары (ультраширокопasmові радари), які можуть бачити пошкодження на глибині кількох сантиметрів всередині батарейного блоку; радіохвильові томографи, які створюють "зрізи" батареї подібно до медичної томографії.

Більш детальну інформацію про технічний стан працюючих двигунів можна отримати за допомогою автокореляційної обробки сигналу. Автокореляційний аналіз радіошуму дає змогу визначити спектр амплітудних модуляцій. Для кожного двигуна спочатку отримують спектр амплітудних модуляцій, а потім заносять ці дані в довготривалу пам'ять бортового комп'ютера.

Вивчення сучасної літератури показує, що застосування радіотехнічних методів діагностики активно розвивається у багатьох галузях транспорту, зокрема в автомобільній техніці. Одним з основних напрямків є використання методів аналізу радіошуму для визначення технічного стану двигунів та інших критичних елементів автомобіля. Це дозволяє значно знизити витрати на діагностику та ремонт, а також підвищити безпеку експлуатації транспортних засобів [3].

Наукові роботи також відзначають важливість точного ідентифікування спектра модуляцій радіошуму, оскільки зміни в амплітудних і фазових характеристиках сигналу можуть свідчити про технічні несправності. Спектральний аналіз радіосигналів дозволяє виявляти навіть найменші відхилення, що можуть бути показниками дефектів в роботі вузлів автомобіля.

Основною проблемою, що виникає при застосуванні радіотехнічної діагностики в автомобільній промисловості, є необхідність розробки ефективних методів обробки та аналізу радіосигналів, що враховують специфіку роботи кожного типу автомобіля та його технічних систем [4]. Рішення цієї проблеми вимагає:

- розробки нових методів вимірювання та аналізу радіошуму для різних типів автомобільних двигунів та систем;
- створення апаратних комплексів, здатних до точного та швидкого виявлення відхилень у роботі технічних вузлів;
- розробки алгоритмів для автоматичної обробки даних та прийняття рішень щодо необхідності проведення ремонту або оптимізації роботи автомобіля.

Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямку мають на меті удосконалення методів радіотехнічної діагностики для підвищення ефективності управління технічним станом автомобіля та його безпечної експлуатації.

Радіошум є важливим аспектом у контексті дослідження технічного стану двигунів. Оскільки різні джерела радіошуму можуть вказувати на конкретні технічні проблеми, то аналіз такого шуму дає змогу своєчасно виявляти несправності. Зокрема, частотні характеристики шуму можуть допомогти виявити аномалії в роботі двигуна, такі як неправильне згоряння пального в теплових двигунах або зношення компонентів у електричних і фрикційних парах. Інтегральна потужність радіошуму, що виникає від працюючих теплових двигунів, є результатом розподілу електричних зарядів у зоні згоряння пального. У випадку електричних двигунів, радіошум виникає через утворення струмів зміщення в електричних контактах, а у фрикційних парах тертя – через наявність контактної різниці потенціалів [5]. Такий підхід дозволяє не лише здійснювати поточний моніторинг роботи двигуна, але й передбачати можливі поломки, що є важливим для забезпечення надійності та безпеки експлуатації техніки.

Ось кілька авторів та література, які можуть бути корисними для дослідження проблем наукового напрямку «Радіотехнічна діагностика автомобіля»:

В.М. Литвинов, В.Ю. Степанов - Радіотехнічна діагностика технічного стану автомобіля: теорія та практика. У цій книзі розглядаються основи радіотехнічної діагностики, методи аналізу радіошуму та застосування радіотехнічних методів для оцінки стану різних систем автомобіля.

О.В. Чайка, А.В. Сидоренко - Радіофізичні методи та прилади для діагностики технічного стану транспортних засобів. Праця зосереджена на розробці методів радіофізичної діагностики, таких як вимірювання радіошуму, для контролю за роботою двигунів та інших важливих систем автомобілів.

І.В. Куликов - Методи і засоби радіотехнічної діагностики в автомобільній промисловості. Книга охоплює застосування радіотехнічних методів для моніторингу стану автомобілів, від двигунів до електронних систем, з акцентом на використання інноваційних радіодіагностичних інструментів.

А.Н. Бенашвілі - Аналіз та обробка радіошуму для діагностики технічних систем. У роботі розглядаються методи обробки радіошуму для виявлення несправностей в транспортних засобах, а також питання спектрального аналізу сигналів та їх застосування в діагностиці.

Ю.С. Рябков, М.С. Деркач - Основи радіотехнічної діагностики: теоретичні та практичні аспекти. Книга охоплює теоретичні засади та практичні аспекти застосування радіотехнічних методів для діагностики технічних систем, зокрема автомобільних.

М.А. Клімов - Автомобільні двигуни та їх радіотехнічна діагностика. У книзі обговорюються різні підходи до моніторингу та діагностики автомобільних двигунів за допомогою радіотехнічних методів, зокрема, за допомогою аналізу спектрів модуляцій радіошуму.

Ці джерела можуть служити науковою основою для подальших досліджень та розробок у сфері радіотехнічної діагностики автомобіля.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У зв'язку з цим виникає завдання: розробити дистанційну та бортову апаратуру для аналізу та прийняття правильного рішення щодо продовження руху або оптимального управління транспортом шляхом аналізу радіошуму кожного окремого працюючого блоку (якщо це відноситься до двигуна), як в автоматизованому, так і в автоматичному режимі.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити метод та відповідну апаратуру для аналізу та вимірювання інтегральної потужності радіошуму різних транспортних засобів;
- розробити метод ідентифікації спектра амплітудних і фазово-частотних модуляцій, а також їх відхилення від еталонного шляхом аналізу зображення отриманого спектра модуляцій кожної з гармонік;
- провести аналіз отриманих результатів обробки радіошуму для різних видів транспорту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтегральна потужність радіошуму є важливим показником технічного стану теплових двигунів. Радіошум виникає внаслідок електромагнітного випромінювання, що супроводжує процеси горіння палива у камері згоряння. У камері згоряння теплового двигуна відбувається розділення електричних зарядів. Після виходу продуктів згоряння через вихлопний отвір відбувається нейтралізація цих зарядів, що спричиняє електромагнітне випромінювання в радіочастотному діапазоні. Радіохвилі поширюються у навколишньому середовищі та всередині транспортного засобу, де вони поводяться як хвилі у плазмовому хвилеводі.

Радіочастотний сигнал має комплексну структуру, тобто, модуляція частоти і модуляція амплітуди, а джерело модуляцій - нестационарне горіння палива. Процес горіння і, відповідно, характеристики радіошуму залежать від роботи форсунки, кількості палива, що впорскується та об'єму та складу повітря, що подається в камеру згоряння; типу камери згоряння (однокамерна або багатоканальна конструкція) і газодинаміки процесу згоряння.

Аналіз інтегральної потужності і спектральних характеристик радіошуму дозволяє здійснювати оперативну діагностику стану двигуна без його розбирання, своєчасно виявляти несправності у роботі паливної апаратури та процесі згоряння, оптимізувати процес горіння для підвищення паливної економічності та екологічності, підвищити надійність і довговічність експлуатації двигуна [6].

У працюючих теплових двигунах максимум інтенсивності радіочастотного випромінювання зазвичай зосереджений у діапазоні 90–150 кГц. Це випромінювання виникає внаслідок електромагнітних процесів у камері згоряння під час розділення і нейтралізації електричних зарядів. Цей діапазон частот не використовується для радіомовлення, однак піддається впливу атмосферних радіошумів. Проте при розміщенні сенсорів радіошуму всередині транспортного засобу вплив атмосферних перешкод значною мірою блокується завдяки екрануванню металевим корпусом [7].

Для електричних систем, зокрема електродвигунів та акумуляторних батарей, характер випромінювання дещо інший. У електродвигунах основні джерела радіошуму пов'язані з струмами зміщення в контактах, колекторно-щіткових вузлах та індуктивних компонентах, що зумовлює появу випромінювання у ширшому діапазоні — від кількох кілогерц до сотень кілогерц, залежно від конструкції системи.

В електробатареях (особливо високовольтних) джерелом радіошуму є процеси заряджання/розряджання, що супроводжуються переміщенням іонів і пульсаціями напруги, що можуть створювати слабе випромінювання в діапазоні десятків до сотень кілогерц, але з меншою інтенсивністю у порівнянні з тепловими двигунами.

Для теплових двигунів радіовипромінювання має переважно стабільний максимум у вузькому діапазоні частот. Для електричних силових установок випромінювання ширше розподілене по спектру і більше залежить від режимів роботи інверторів, перетворювачів та імпульсних джерел живлення.

Металевий корпус транспортного засобу екранує радіочастотне випромінювання, тому вплив зовнішніх атмосферних перешкод усередині автомобіля або іншого транспорту значно знижується, що дозволяє точно реєструвати власні сигнали, пов'язані з роботою двигуна чи батареї. Зовнішні і внутрішні механічні впливи на корпус транспортного засобу реєструються у діапазоні 10–1000 Гц.

Джерелами модуляції радіошуму, окрім нестабільного горіння пального, радіовипромінювання модулюється роботою таких елементів: компресора, турбіни, різних механічних навантажень, що передаються на корпус транспортного засобу, фрикційними парами тертя. Процеси ерозійного горіння пального характеризуються частотами в межах 1500–3500 Гц.

Використання частотного розподілу для технічної діагностики дозволяє:

- здійснювати безперервний моніторинг технічного стану теплових двигунів;
- проводити окремі вимірювання інтегральної потужності випромінювання в двох ключових діапазонах (10–1000 Гц та 1500–3500 Гц). Обидва типи впливів діють незалежно, але їхня сукупна дія визначає працездатність двигуна і допоміжних систем. Оцінка готовності транспортного засобу до подальшого руху проводиться шляхом розрахунку добутку потужностей у двох діапазонах. Критерієм прийняття рішення є ступінь відхилення від середнього ефективного значення потужності, індивідуально встановленого для кожного транспортного засобу [8].

Дослідження спектральної потужності радіошуму проводиться під час руху транспортного засобу розпізнаванням спектральних образів амплітудної модуляції сигналу та порівнянням отриманого спектра з еталонним. Критеріями оцінки є відхилення за амплітудою або частотою окремих спектральних компонент і відхиленням за групами спектральних складових.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз спектральної потужності радіошуму дозволяє:

- обґрунтувати вимоги до розробки бортових автоматизованих систем ухвалення рішень щодо безпечного продовження руху;
- забезпечити дистанційну повну технічну діагностику двигунів транспортних засобів;
- підвищити надійність, безпеку та ефективність експлуатації автомобільного, морського і повітряного транспорту.

Останні дослідження в галузі радіотехнічної діагностики автомобілів та електромобілів спрямовані на розробку безконтактних, високоточних методів виявлення несправностей та моніторингу технічного стану транспортних засобів у режимі реального часу. Нижче наведено ключові напрями цих досліджень:

1. Радіочастотна і мікрохвильова діагностика дозволяє використання електромагнітного випромінювання (діапазон від десятків МГц до десятків ГГц) для аналізу фізичних змін у матеріалах та вузлах авто. Застосовується для контроль корозії елементів кузова, виявлення дефектів у високовольтних ланцюгах електромобілів, діагностики обмоток електродвигунів та інверторів.

2. Безконтактний радіолокаційний моніторинг сприяє розвитку FMCW-радарів (Frequency-Modulated Continuous Wave). Системи на базі 24 ГГц та 77 ГГц радарів дозволяють не лише аналізувати дорожню обстановку, а й виявляти вібрації вузлів під час роботи, визначати зміни у поведінці механізмів, які свідчать про знос або наближення до відмови.

3. Радіотехнічна діагностика акумуляторних систем електромобілів використовує ВЧ-сигнали для аналізу стану літій-іонних елементів для вимірювання імпедансу та резонансних характеристик, визначення внутрішньої деградації елементів без відкриття корпусу, створення портативних пристроїв для радіочастотної оцінки залишкової ємності.

4. Електромагнітна діагностика двигунів використовує моделі на основі ЕМ-сканування для виявлення міжвиткових замикань у статорі, аналізу магнітного поля для оцінки зносу підшипників або розбалансування.

5. Інтеграція з ШІ та IoT дозволяє застосування методів машинного навчання для аналізу радіотехнічних сигналів, класифікації типів несправностей за частотними характеристиками, підключення до хмарних платформ та дистанційний моніторинг стану електромобіля в реальному часі.

6. Перспективи розвитку полягають в мініатюризації сенсорів і інтеграції у штатні системи автомобілів та для використання терагерцових сканерів для глибокого контролю стану композитних матеріалів кузова при впровадженні методів радіотехнічної діагностики для автосервісів і техоглядів.

У статті приведені приклади, пов'язані з дослідженням поставленого завдання.

1. Розробка методу та апаратури для аналізу та вимірювання інтегральної потужності радіошуму транспортних засобів — це складна, але актуальна інженерна задача, що стосується електромагнітної сумісності (ЕМС), екологічної безпеки, кіберзахисту та радіомоніторингу. Для цього необхідно визначити інтегральну (сумарну) потужність радіошуму, що випромінюється транспортним засобом (ДВЗ, гібрид, електромобіль) у певному діапазоні частот, з урахуванням роботи двигуна та електрообладнання, зарядних систем (у разі електромобілів) та систем комутації (інвертори, ШІМ).

Методологія вимірювання полягає у визначенні діапазону частот для автомобільних систем з 150 кГц – 30 МГц (низькочастотний шум) та 30 МГц – 1 ГГц (високочастотний ЕМ-шум від цифрових та силових електронних систем). При виборі параметрів (таблиця 1.) інтегрування розраховують інтегральну потужність, що дорівнює інтегралу спектральної щільності потужності (PSD) по заданому діапазону:

$$P_{\text{інтегр}} = \int_{f_2}^{f_1} S(f) df$$

де $S(f)$ - спектральна щільність потужності шуму.

Для вимірювання використовують два режими:

- Стационарний вимір: у контрольному середовищі (екранована камера або полігон).
- Польовий вимір: за реальної експлуатації (дорога, майданчик).

Таблиця 1. Параметри вимірювального комплексу

Компонент	Опис
Антенa (широкопсмугова)	Логоперіодична, рамкова або феритова для діапазону 150 кГц – 1 ГГц.
ФНЧ/ВНЧ фільтри	Для виключення позасмугових сигналів.
Передпідсилювач	Підвищує чутливість системи.
Аналізатор спектру / SDR	Високочастотний аналіз сигналів з можливістю інтегрування PSD.
Обробник сигналу (модуль/ПЗ)	Обчислення інтегральної потужності, фільтрація, логування.
ПЗ управління	Візуалізація результатів, порівняння з нормами (CISPR, ГОСТ, ISO).

Мови/платформи: Python + SDR-пристрої (RTL-SDR, HackRF, USRP) або LabVIEW.

Функції поставлених завдань: аналіз, побудова спектрограм, автоматичне обчислення потужності, порівняння з нормативами. Далі проводиться оцінка результатів за допомогою побудови графіка інтегральної потужності по часу, карти розподілу по частоті/амплітуді. Використовується нормативна база: CISPR 12, 25 – радіоперешкоди від транспортних засобів; ГОСТ 30377, ГОСТ Р 51317 – методики випробування ЕМ-випромінювання; ISO 11452-1 – імунітет до радіочастотного випромінювання.

2. Розробка методу, що дозволяє автоматично виявляти ідентичність або відхилення в спектрі амплітудних та фазово-частотних модуляцій (АЧМ та ФЧМ) відносно еталонного зразка шляхом аналізу спектрального зображення кожної з гармонік сигналу полягає в необхідності створити метод і апаратно-програмний комплекс для виділення спектра модуляцій (АМ - варіації амплітуди гармонік, FM, PM - зміщення фази/частоти відносно несучої) кожної гармоніки сигналу, побудови його зображення/спектрограми, порівняння зі спектром еталонного сигналу та виявлення відхилень у модуляціях. Аналіз зображення модуляцій отриманих результатів обробки радіошуму для різних видів транспорту представлений на Рисунку 1.

На графіках можна побачити:

1. АМ-сигнал — синусоїда з амплітудною модуляцією.
2. Огинаюча сигналу, яка повторює форму низькочастотної модуляції.
3. Спектр огинаючої — містить основну модуляційну частоту (10 Гц) та гармоніки.

Цей приклад демонструє основний етап методу: перетворення сигналу у зображення спектру амплітудної модуляції.

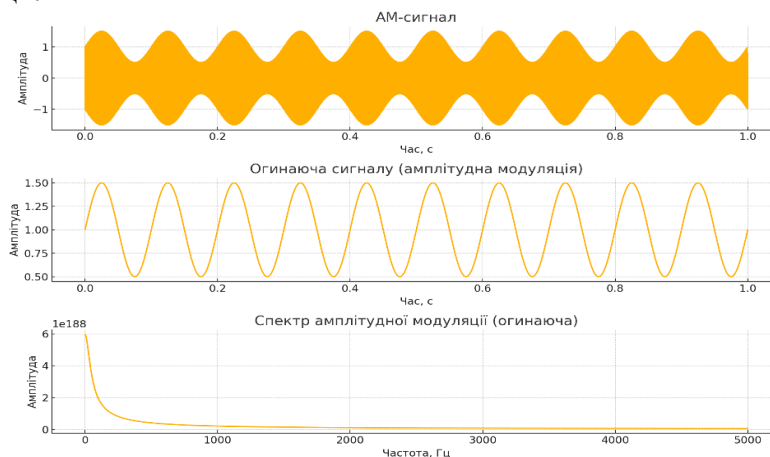


Рисунок 1. - Приклад Python-реалізації спектрального аналізу однієї гармоніки з побудовою її спектру амплітудної модуляції.

3 Для проведення аналізу результатів обробки радіошуму різних видів транспорту (ДВЗ, гібридів, електромобілів) потрібно оцінити, як змінюється інтегральна потужність, спектральний розподіл і тип модуляційних відхилень залежно від джерела шуму та принципу дії силового обладнання. Нижче подано структурований аналіз (таблиця 2).

Таблиця 2. Загальна характеристика транспортних засобів за рівнем радіошуму

Вид ТЗ	Основні джерела радіошуму	Очікуваний спектр	Особливості
ДВЗ (бензин/дизель)	Генератор, запалювання, форсунки, ЕБУ	До 30 МГц	Імпульсний, переривчастий шум, сильна АМ
Гібрид	Електродвигун, інвертор, ДВЗ, батарея	150 кГц – 100 МГц	Комбінований спектр з сильними АМ/ФМ
Електромобіль	Інвертори, ШІМ, батарея, зарядний блок	150 кГц – 300 МГц	Високочастотний шум, фазові модуляції, імпульсна структура

Для ДВЗ: - АМ-модуляція: домінує через генератор і запалювання.

- Відхилення: нестабільність амплітуди в низькочастотному діапазоні (100–500 кГц).

- Спектр: піки на 200 кГц, 800 кГц – типові для генераторів.

- Інтегральна потужність: до 0.5–1.2 мВт у межах 150 кГц–30 МГц.

Для гібридів: - Модуляції: комбіновані АМ/ФМ. Присутні гармоніки ШІМ керування.

- Відхилення: розширення спектра при перемиканні між режимами (електро/ДВЗ).

- Спектр: щільний в діапазоні 100 кГц–10 МГц, з "гребінцем" гармонік ШІМ.

- Інтегральна потужність: 2–5 мВт, залежно від режиму руху.

Для електромобіля: - ФМ/РМ-модуляції: характерні для інверторів і комутації.

- Відхилення: флуктуації частоти гармонік, «плаваючі» піки.

- Спектр: ширший, інтенсивніший у ВЧ-діапазоні (30–300 МГц).

- Інтегральна потужність: може перевищувати 10 мВт при зарядці або розгоні.

Нижче подано порівняльну візуалізацію (таблиця 3).

Таблиця 3. Порівняльна візуалізація (сценарій)

Параметр	ДВЗ	Гібрид	Електромобіль
Частотний діапазон шуму	100 кГц–30 МГц	100 кГц–100 МГц	150 кГц–300 МГц
Тип модуляції	АМ	АМ+ ФМ	ФМ+РМ
Наявність гармонік	х	✓	✓ ✓
Максимальна інтегральна потужність (випромінена)	~1 мВт	~5 мВт	~10–15 мВт
Стійкість до відхилень	Висока	Середня	Низька (чутливий спектр)

Електромобілі мають найбільш широкий і інтенсивний радіошумовий спектр, пов'язаний з частотними модуляціями інверторів та високою швидкістю комутацій. Порівняльна спектрограма для трьох типів транспортних засобів представлена на Рисунку 2.

1. Гібриди демонструють змішані типи шуму, які можуть суттєво змінюватися залежно від режиму роботи (що ускладнює ідентифікацію).
2. ДВЗ є більш "передбачуваними" з точки зору шумів — у них домінує амплітудна модуляція, що чітко виділяється у спектрах.



Рисунок 2. - Порівняльна спектрограма для трьох типів транспортних засобів

На графіках представлено умовні спектри радіошуму для трьох типів транспортних засобів:

- ДВЗ: зосередження енергії в нижньому частотному діапазоні - типовий АМ-шум.
- Гібрид: складна структура спектру з гармоніками та флуктуаціями - наслідок перемикавання режимів.
- Електромобіль: високочастотна енергія з великою кількістю гармонік - характерно для ШІМ-комутації та інверторів.

ВИСНОВКИ

Радіотехнічна діагностика швидко трансформується зі сфери військових і аерокосмічних технологій у повсякденну експлуатацію автомобілів і електромобілів, відкриваючи нові горизонти для безконтактного, точного та швидкого моніторингу технічного стану. Ось приклади сучасних комерційних та експериментальних систем радіотехнічної діагностики, що застосовуються для автомобілів та електромобілів:

1. Bosch Radar-Based Diagnostics - автомобільні радары (24 та 77 ГГц). Спочатку створені для допомоги водієві (ADAS), але використовуються також для моніторингу вібрацій підвісок та для оцінки зміни профілю шин (через аналіз відбитих радіохвиль).
2. Vector eMobility Testing Solutions - діагностика високовольтних систем електромобіля (HV battery, e-motor, інвертор, RF-випромінювання для виявлення паразитних імпульсів і перешкод та підтримка аналізу EMC-випромінювання елементів силової електроніки).
3. Fluke ii910 Precision Acoustic Imager - візуалізація ультразвукових хвиль і радіовипромінювання. Застосовуються для виявлення витоків високої напруги та частот у енергосистемах електромобілів без зупинки роботи.
4. MIT CSAIL – RF-Pose - використання радіохвиль Wi-Fi діапазону для створення зображення рухомих механізмів крізь кузов, контроль динаміки елементів під час роботи двигуна або ходової частини, аналіз коливань і теплових деформацій.
5. Fraunhofer IMS – Smart Radar Sensor for Predictive Maintenance - інтеграція мікрорадарів у вузли автомобіля, можливе безконтактне виявлення механічного зносу, постійний контроль відхилень у роботі електромотора.
6. Oak Ridge National Laboratory (США) – RF Battery State Analyzer - аналіз стану акумулятора на основі мікрохвильового резонансу, дозволяє визначити стан літій-іонних комірок без розбирання батареї.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гречихін Л. І. (2016) Радіотехнічна діагностика транспортних систем / Л. І. Гречихін, Н. Г. Куць // Наукові нотатки. - 2016. - Вип. 55. - С. 87-89. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_18

2. Дембіцький В.М. (2018). Технічна експлуатація автомобілів [Текст]: Навчальний посібник / В.М. Дембіцький, В.І. Павлюк, В.М., Придюк – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – 473 с.
3. Веремей Г. О. (2017). Сучасні засоби технічної діагностики автомобілів. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.07010601 - «Автомобільний транспорт» спеціальності 8.07010601 - «Автомобілі та автомобільне господарство». – Чернівці: ЧНТУ, 2017. – 56 с.
4. Рязанцев О. В. (2023) Конспект лекцій з дисципліни «Радіотехнічні системи» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності - 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». - Кам'янське; ДДТУ, 2023 р. – 90с.
5. Мигаль В. Д. (2018) Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія / В. Д. Мигаль. Х.: Майдан, 2018. 262 с. ISBN 978-966-372-704-2.
6. В. М. Кичак (2018) Радіотехнічні системи (Основи проектування. Частина 1) : навчальний посібник / В. М. Кичак, А. Ю. Воловик, М. А. Шутило, О. П. Червак – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 122 с.
7. Мигаль В. Д., Лебедєв А.Т., Шуляк М.Л. (2019) Технічна діагностика автомобілів: конспект лекцій з дисципліни / - Харків : ХНТУСГ, 2019. - 129 с.
8. Паламар М.І., Стрембіцький М.О. (2023) Системи прецизійного управління мехатронних систем / Конспект лекцій за спеціальностями 175 «Інформаційно-вимірювальні технології», 176 – Мікро-та наносистемна техніка. – Тернопіль, 2023 – 94 с.

REFERENCES

1. Grechikhin LI (2016) Radiotechnical diagnostics of transport systems / LI Grechikhin, NG Kuts // Scientific Notes. - 2016. - Issue 55. - С. 87-89. - Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_18
2. Dembitsky V.M. (2018). Technical operation of cars [Text]: Study guide / V.M. Dembitskyi, V.I. Pavliuk, V.M. Prydiuk - Lutsk: Lutsk NTU, 2018. - 473 p.
3. Veremei H.O. (2017). Modern means of technical diagnostics of cars. Methodical instructions for performing laboratory work for students of the training direction 6.07010601 - "Road transport" specialty 8.07010601 - "Cars and automotive economy." - Chernihiv: ChNTU, 2017. - 56 p.
4. Ryazantsev O. V. (2023) Lecture notes on the discipline "Radio Engineering Systems" for applicants for higher education of the second (master's) level in the specialty - 172 "Electronic Communications and Radio Engineering". - Kamianske; DSTU, 2023 - 90 p.
5. Myhal VD (2018) Intelligent systems in the technical operation of cars: monograph / VD Myhal. Kh.: Maidan, 2018. 262 c. ISBN 978-966-372-704-2.
6. Kychak VM (2018) Radio engineering systems (Design basics. Part 1): a textbook / VM Kychak, AY Volovyk, MA Shutilo, OP Chervak - Vinnytsia: VNTU, 2018. - 122 p.
7. Migal VD, Lebedev AT, Shulyak ML (2019) Technical diagnostics of cars: lecture notes on the discipline / - Kharkiv: KHNTUA, 2019. - 129 c.
8. Palamar M.I., Strembitskyi M.O. (2023) Precision control systems of mechatronic systems / Lecture notes in the specialties 175 "Information and measurement technologies", 176 "Micro- and nanosystems technology." - Ternopil, 2023 - 94 p.

Kuts N.G., Bulik Y.V., Dubytskyi O.S., Mazylyuk P.V. Radio technical diagnostics of a car

This article provides a brief analysis of the scientific field of "Radio Technical Diagnostics of a Car". Automotive radio diagnostics is a method of technical control of automotive systems and components based on the use of radio waves (radio signals) to detect malfunctions, defects or changes in the physical properties of materials without disassembling or dismantling them. Operating thermal and electric motors are sources of intense electromagnetic radiation in the radio range. This radiation is modulated in frequency and amplitude by both internal processes of radio radiation generation and external influences. Using integral, spectral and correlation processing of a complex radio signal, it is possible to determine the main parameters of engine operation, the magnitude of internal friction and the nature of external influences on a moving vehicle. This makes it possible to assess the possibility of further use of the vehicle and to carry out its optimal management.

Thermal and electric motors, which are widely used in all types of transportation, are sources of intense electromagnetic radiation in the radio range. This radiation is modulated in frequency and amplitude. Modulation is caused by both internal processes of radio signal formation and external influences.

Integral, spectral, and correlation processing of the radio signal makes it possible to determine the main parameters of engine operation, the amount of internal friction, and the nature of external influences on

the vehicle while driving. This, in turn, makes it possible to assess the feasibility of further operation of the vehicle and ensure its efficient management.

Key words: transport, engine, radio radiation, technical diagnostics, radio signal,

КУЦЬ Надія Григорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: kuts.nadia86@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

БУЛІК Юрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>

ДУБИЦЬКИЙ Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: oleksandr.dubyskyi@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-4863-4040>

МАЗИЛЮК Павло Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: mazyliuk@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0001-5071-5109>

Nadiia KYTS, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: kuts.nadia86@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

Yuriy BULIK, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>

Oleksandr DUBITSKY, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: oleksandr.dubyskyi@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-4863-4040>

Pavlo MAZILYUK, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: mazyliuk@lutsk-ntu.com.ua <https://orcid.org/0000-0001-5071-5109>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1731

Мармут І.А., Шестов С.О.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПЕРЕВІРКИ КАНАЛІВ ВИМІРЮВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ ПАРАМЕТРІВ АВТОМОБІЛІВ НА ІНЕРЦІЙНОМУ РОЛИКОВОМУ СТЕНДІ

В умовах стійкої тенденції збільшення кількості рухомого складу, в першу чергу за рахунок легкових автомобілів індивідуальних власників, потребує у майбутньому підвищеної уваги до контролю технічного стану. Це стосується систем автомобілів, які впливають на безпеку дорожнього руху. Ключовою з таких систем є гальмівна система. Якісну перевірку технічного стану можна здійснити за допомогою інструментальних засобів (стендів). В експлуатаційній діагностиці найбільш розповсюджені силові стенди для діагностування гальмівних систем. Як показують різноманітні дослідження, більш достовірну інформацію про стан гальмівної системи можна отримати за допомогою інерційних роликових стендів.

Також таке обладнання може бути використано у проведенні досліджень. Це пов'язано з тим, що інерційний спосіб діагностування гальмівної системи дозволяє моделювати реальні температурні та швидкісні режими роботи гальмівної системи. Тому питання створенні якісного діагностичного обладнання є актуальним.

Ще одним із аргументів застосування інерційного методу перевірки гальмівних систем на швидкісних стендах є можливість повноцінної перевірки сучасних гальмівних систем, які оснащені ABS.

Інерційний роликовий стенд має інші принципи реалізації та будови вимірювальної системи. Важливим принципом для вимірювальної системи є забезпечення необхідної точності реєстрації діагностичних параметрів. Це також обумовлюється вимогами відповідних стандартів для такого обладнання. Метрологічні характеристики вимірювальної системи роликового стенда обумовлені типом первинного датчика. Крім того, важливим аспектом є питання періодичної метрологічної атестації засобів вимірювальної техніки.

У статті розглянуті методики перевірки каналів вимірювальної системи інерційного роликового стенда, який створений у ХНАДУ на кафедрі технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. Говорущенко М.Я. і входить у склад пересувної станції діагностики легкових автомобілів. Основними параметрами, які характеризують стан гальмівної системи є стале уповільнення, час спрацювання, гальмівний шлях, час приведення у дію пристрою для натискання на гальмівну педаль.

Розроблені методики метрологічної перевірки каналів вимірювальної системи дозволяють забезпечити розробку програми періодичної перевірки засобів вимірювальної техніки органами стандартизації.

Ключові слова: роликовий стенд, гальмівна система, стале уповільнення, час спрацювання, гальмівний шлях, метрологічний контроль.

ВСТУП

За останні роки в Україні спостерігається збільшення кількості легкових автомобілів [1]. В основному це здійснюється за рахунок ввезення вживаних транспортних засобів. Це приводить до збільшення середнього віку автомобілів, що рухаються по дорогах країни [2]. В свою чергу питання контролю технічного стану (технічний огляд) для автомобілів індивідуальних власників залишається відкритим з причини воєнного стану. Однак, після закінчення бойових дій, повернення технічного огляду для індивідуальних власників буде відновлено. Для якісного проведення перевірок систем автомобілів, що впливають на безпеку руху потрібне відповідне діагностичне обладнання. Насичення таким обладнанням підприємств автосервісу буде актуальним. Разом зі стаціонарними підприємствами такі роботи можуть виконувати підприємства мобільного сервісу [3]. Для їх оснащення виникає потреба у мобільних стендах, на яких можна виконувати перевірку систем автомобілів, що забезпечують безпеку руху. Особливо це стосується гальмівних систем. Як відомо, якісну перевірку гальмівної системи може забезпечити інерційний роликовий стенд. Він дозволяє моделювати реальні режими роботи гальмівної системи автомобіля [4].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Кафедра технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. Говорущенко М.Я. (ТЕСА) має достатній досвід у розробці роликових стендів інерційного типу [4-6]. Технічні вимоги до стану гальмівної системи колісного транспортного засобу (КТЗ) відображені у ДСТУ 3649:2010 [7]. Згідно цього стандарту перевірка гальмівної системи виконується двома методами: методом дорожніх або стендових випробувань. Безумовно, при інструментальному контролі застосовується стендова перевірка гальмівної системи.

Вимоги до стендів для перевірки гальмівних систем представлені у ДСТУ 3333-96 [8]. Для якісної перевірки параметрів гальмівної системи автомобіля важливо забезпечити необхідну точність

вимірювання (табл. 1).

Таблиця 1 – Вимоги до точності вимірювання параметрів на роликових гальмівних стендах [8]

Назва параметра	Одиниця вимірювання	Границя допустимої основної похибки, %, не більше, для стендів		
		інерційного	силового	інерційно-силового
1. Гальмівна сила колеса	кН	-	± 3,0	± 3,0
2. Уповільнення колеса	м/с ²	± 4,0	-	± 4,0
3. Тривалість спрацьовування гальмівної системи	с	± 1,0	± 1,0	± 1,0
4. Тривалість приведення в дію органу керування	с	± 5,0	+ 5,0	± 5,0
5. Зусилля на органі керування	Н	± 2,5	± 2,5	± 2,5
6. Тиск у пневмоприводі	МПа	± 2,5	± 2,5	± 2,5
7. Гальмівний шлях	м	± 1,5	-	± 1,5
8. Швидкість	км/год	± 2,0	-	± 2,0
9. Коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил коліс осі	-	± 10,0	± 10,0	± 10,0
10. Загальна питома гальмівна сила	-	± 10,0	± 10,0	± 10,0
11. Асинхронність тривалостей спрацьовування гальмівного привода ланок автопоїзда	с	± 5,0	± 5,0	± 5,0
12. Коефіцієнт сумісності ланок автопоїзда	-	± 10,0	± 10,0	± 10,0

На кафедрі ТЕСА ХНАДУ розроблена пересувна станція діагностики легкових автомобілів (ПДС-Л), у склад якої входить інерційний роликовий стенд для діагностування гальмівних систем [4]. Вимірювальна система (ВС) роликового стенда представляє собою імпульсно-цифрову систему вимірювання з фотодатчиком [4, 9-12].

Для забезпечення стабільності та якості вимірювань параметрів гальмівної системи необхідно виконувати періодичний метрологічний контроль ВС [13, 14]. Типові методики оцінки якості вимірювань розглянуті у джерелах [15-20].

Специфічні особливості конструкції ВС роликового стенда, що входить у склад ПДС-Л потребують розробки певних методик перевірки каналів вимірювання наступних параметрів гальмівної системи: сталого уповільнення колеса, часу спрацьовування гальмівної системи, гальмівного шляху, тривалість (швидкість) включення пристрою для натискання на педаль гальм.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є удосконалення методики перевірки каналів ВС інерційного роликового стенда для забезпечення проведення вихідного метрологічного контролю при атестації засобів вимірювальної техніки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі, які полягають у розробці наступних методик:

- метрологічного контролю каналу вимірювання гальмівного шляху
- метрологічного контролю каналу вимірювання показника спрацьовування;
- метрологічного контролю каналу вимірювання швидкості включення пристрою натискання на педаль гальма;
- метрологічного контролю каналу формування затримки 0,5с (при вимірюванні показника спрацьовування);
- метрологічного контролю каналу вимірювання показника уповільнення.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У ВС роликового стенда ПДС-Л реалізована безконтактна система з фотоелектричними датчиками. Елемент, що задає сигнали – встановлений на обертовому валу обтюратор з пазами для фотодатчика (Z – кількість пазів або виступів). Обтюратор – це заслінка, що періодично перекриває світловий потік: проріз обтюратора збуджують на датчику імпульс. Кількість імпульсів відповідає

шляху: $S = Z \cdot \delta S$. Схема ВС роликового стенда представлена на рис. 1 [4].

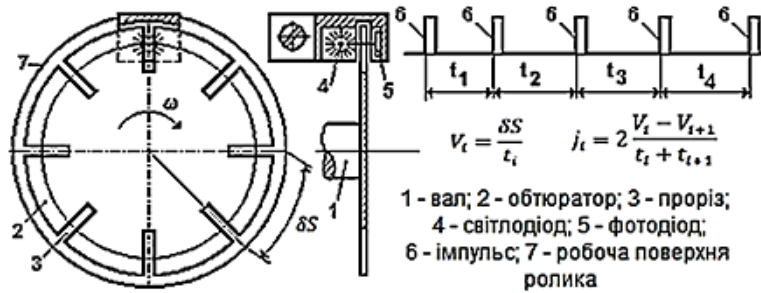


Рисунок 1 – Імпульсно-цифрова ВС роликового стенда ПДС-Л для вимірювання кутової швидкості та прискорення (уповільнення) з фотодатчиком [4]

1. Методика метрологічного контролю каналу вимірювання гальмівного шляху (ГШ)

Методика передбачає імітацію сповільнення руху роликів. Для проведення перевірки необхідні наступні прилади і пристрої: генератор сигналів спеціальної форми Г6-26; частотомір типу ЧЗ-32, ЧЗ-34, ЧЗ-54 або йому подібний; перехідник роз'єму РКМ 10x10 (2 шт.) з відведеннями. Схема перевірки представлена на рис. 2.

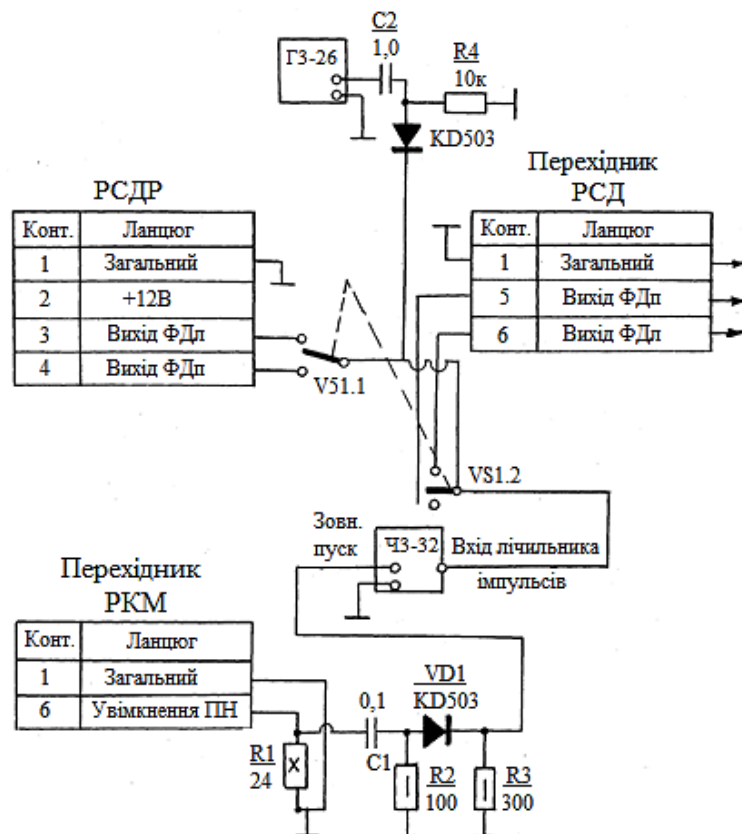


Рисунок 2 – Схема перевірки каналу вимірювання гальмівного шляху: РКМ – роз'єм керування муфтами; РСДР – роз'єм сигналів датчиків (розетка); РСД – роз'єм сигналів датчиків

Метрологічний контроль каналу вимірювання ГШ проводиться методом порівняння показань індикатора пульта стенду і зовнішнього (повіреного) лічильника електричних імпульсів (генератора Г6-26).

Для проведення контролю необхідно провести наступні дії:

- зібрати схему перевірки (см. рис. 2), від'єднавши від стенду роз'єм фотодатчиків;
- встановити на генераторі значення частоти, що перевищує в 1,05 рази значення частоти, що відповідає початку гальмування;
- на пульті встановлюється режим «АВТ.» і «ГАЛЬМУВАННЯ»;

- плавно, але швидко (протягом 1,5 с) зменшити частоту генератора до мінімально можливого значення і переконатися у функціонуванні лічильників;
- записати показання зовнішнього лічильника імпульсів ($N_{обр}$) і лічильника імпульсів вимірника ГШ на пульті ($N_{п}$);
- вимірювання повторити 10 разів і оформити у вигляді табл. 2 по лівому і правому каналам.

Таблиця 2 – Результати перевірки каналу ГШ

Номер заміра	Показання зразкового лічильника $N_{обр}$, імп.	Показання лічильника на пульті $N_{п}$, імп.	Різниця показань $N_{обр} - N_{п}$, імп.	Відносна похибка $\delta_i = \frac{N_{обр} - N_{п}}{N_{обр}}$

Необхідно підрахувати суму показань зразкового лічильника, лічильника пульта і різниць показань лічильників по 10 вимірюванням.

Обчислити середню систематичну похибку показань ГШ на пульті:

$$\bar{\Delta}_{ГШ} = 0,1 \cdot \sum_{i=1}^{10} (N_{обр} - N_{п}). \quad (1)$$

Обчислити середнє квадратичне відхилення (СКВ) показань пульта:

$$\sigma_{\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\delta_i)^2}{9}}. \quad (2)$$

Критерії придатності каналу вимірювання ГШ:

$$|\bar{\Delta}_{ГШ}| \leq 10 \text{ імп.}; \quad \sigma_{\delta} \leq 5. \quad (3)$$

2. Методика метрологічного контролю каналу вимірювання показника спрацьовування (ПС)

ПС за визначенням – це різниця між двома інтервалами часу $t_{поч}$ і $t_{кін} = t_2$. Перший з інтервалів – це період частоти проходження прорізу обтюратора у момент початку гальмування. Він формується ВС при досягненні окружної швидкості роликів одного із значень, що вибирається оператором: 50, 60, 70 або 80 км/год. Другий інтервал (t_2) вимірюється засобами ВС через 0,5с після початку гальмування.

Процедура метрологічного контролю ПС, таким чином, повинна забезпечити метрологічно достовірну імітацію сигналів, формованих фотодатчиками в процесі вимірювання ПС. Метрологічна достовірність імітації може бути забезпечена при виконанні наступних умов:

а) значення початкової частоти імпульсів повинно відповідати одному із значень лінійної швидкості, при якій включається «пневмонога» – пристрій для натискання на гальмівну педаль;

б) період проходження імпульсів фотодатчика $t_{поч}$ або імпульсного сигналу, що імітує сигнали фотодатчика, повинен бути відомий наперед, або зміряний у момент початку гальмування зовнішніми вимірювальними приладами;

в) за час, що не перевищує 0,5с – період проходження імпульсного сигналу, що імітує роботу фотодатчиків, повинен змінитися до величини $t_{кін}$ і бути відомим з метрологічною точністю;

г) процес метрологічного контролю ПС повинен адекватно імітувати роботу стану і його вимірювальної системи не тільки в статичному, але і динамічному режимах.

На підставі вищевикладеного процес метрологічного контролю (МК) каналу вимірювання ПС розбивається на декілька стадій, а саме:

МК каналу включення гальма;

МК каналу формування затримки вимірника ПС (каналу, що формує затримку 0,5с);

МК каналу вимірювання величини $t_{кін}$ і обчислення ПС у вигляді $(t_{кін} - t_{поч})$ (слід врахувати, що у фізично реальній системі завжди $t_{кін} \geq t_{поч}$).

Для реалізації МК каналу вимірювання ПС необхідно зібрати перевірочну схему, представлену

на рис. 3.

2.1 Метрологічний контроль каналу вимірювання швидкості включення пристрою натискання на педаль гальма («пневмоноги»)

Встановити на генераторі «А» значення частоти вихідного сигналу, рівне 1,05 значення частоти імпульсів обтюратора, відповідної вибраної швидкості початку гальмування.

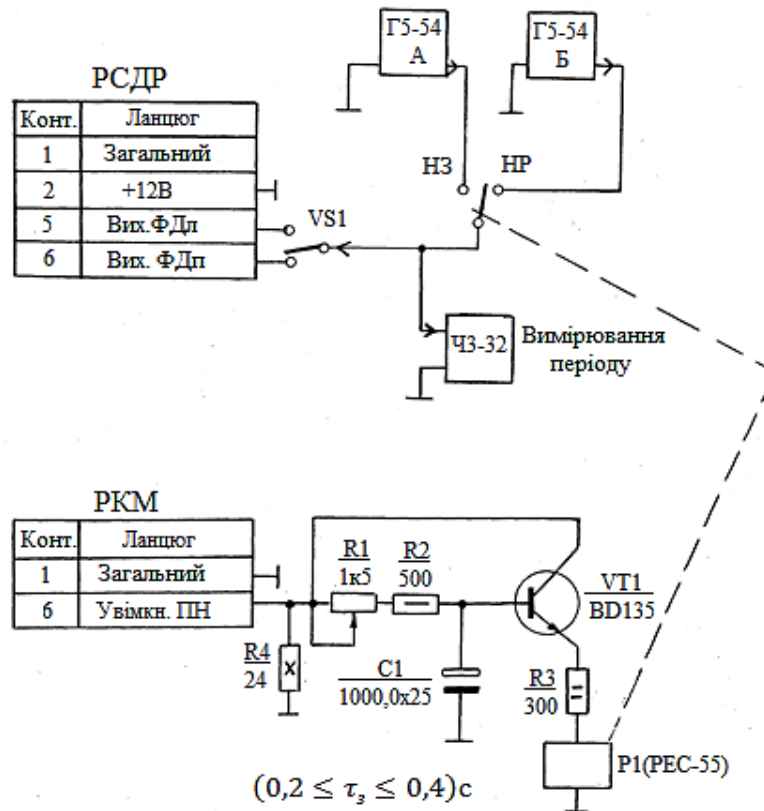


Рисунок 3 – Схема метрологічного контролю каналу ПС

Амплітуда імпульсу повинна складати 10 В; полярність позитивна; тривалість імпульсу:

$$\tau_i = (0,8 \dots 1,5) \tau_{i.обт.розр.} \quad (4)$$

де $\tau_{i.обт.розр.}$ – розрахункова тривалість імпульсу фотодатчика для вибраної швидкості початку гальмування.

Плавню зменшувати частоту сигналу генератора «А» до моменту включення «пневмоноги». Виконати це для всіх значень початкових швидкостей гальмування.

Для кожного із значень початкової швидкості гальмування розрахувати величини:

$$T_{\text{вим.сер.}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{\text{вим}i}}{N}; \quad (5)$$

$$\Delta \bar{T} = (T_{\text{розр.}} - T_{\text{вим}})_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^N (T_p - T_{\text{вим}i})}{N}. \quad (6)$$

Величина $\Delta \bar{T}$ характеризує систематичну похибку каналу включення у вигляді величини, що описує відхилення значення періоду прорізу обтюратора від розрахункового значення для кожної з вибраної швидкості гальмування.

Випадкова складова похибки в цьому випадку містить дві складові: апаратну і методичну, причому зміряти або оцінити їх по окремоті не представляється можливим. Тому оцінку значення випадкової складової похибки каналу включення гальмування проводити по величині СКВ:

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{(T_p - T_{\text{вим}i}) - \Delta T\}^2}{N-1}}. \quad (7)$$

Прийняти рішення про придатність до експлуатації каналу включення гальмування. Критерії придатності:

$$\frac{\Delta T}{T_p} \leq 0,01; \quad \frac{\sigma_{\Delta T}}{T_p} \leq 0,05. \quad (8)$$

2.2 Метрологічний контроль каналу формування затримки 0,5с (при вимірюванні показника спрацьовування)

Процес МК по цьому пункту полягає у вимірюванні величини затримки, яка повинна мати значення: $t_3 = [(0,500) \pm 0,002] \cdot 10^{-3}$ с.

Ухвалити рішення про придатність каналу до експлуатації по цьому критерію.

2.3 Метрологічний контроль каналу вимірювання величини і обчислення ПС

Виконується у вигляді $(t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}})$.

Встановити на генераторі «А» значення однієї з частот, відповідної вибраної початкової швидкості гальмування.

Встановити на генераторі «Б» вибране значення частоти, що забезпечує виконання умови $0,00014 \leq \left(\frac{1}{f_B} - \frac{1}{f_A}\right) \leq 0,003880$.

Плавню зменшуючи значення частоти генератора «А» добитися включення каналу гальмування і записати показання приладу ЧЗ і вимірювальної системи після зупинки процесу рахунку.

Розрахувати для кожного значення початкової швидкості гальмування абсолютні і відносні похибки, систематичну і випадкову складові: $\Delta_c(\text{ПС})$, $\sigma(\text{ПС})$.

Формули для розрахунку метрологічних характеристик каналу вимірювання ПС:

$$\delta(\text{ПС})_i = \frac{\Delta \text{ПС}_i}{\text{ПС}_{\text{ЧЗ}-\text{ЗЗ}}}; \quad (9)$$

$$\Delta(\text{ПС}) = (\text{ПС}_{\text{ЧЗ}-\text{ЗЗ}} - \text{ПС}_{\text{ВС}}); \quad (10)$$

$$\bar{\delta}(\text{ПС}) = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i(\text{ПС})}{N}; \quad (11)$$

$$\sigma(\text{ПС}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{\delta(\text{ПС}) - \bar{\delta}(\text{ПС})_i\}^2}{N-1}}; \quad (12)$$

$$\delta_{\sigma}(\text{ПС}) = \frac{\sigma(\text{ПС})}{\text{ПС}_{\text{ЧЗ}-\text{ЗЗ}}}. \quad (13)$$

Прийняти рішення про придатність до експлуатації каналу вимірювання ПС. Критерії придатності:

$$|\Delta(\text{ПС})| \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}; \quad \sigma(\text{ПС}) \leq 3 \cdot 10^{-6}. \quad (14)$$

3 Методика метрологічного контролю каналу вимірювання показника уповільнення (ПУ)

За визначенням, ПУ є інтервалом часу між моментами досягнення роликами стенду миттєвих швидкостей $V_{\text{поч}}$ і $V_{\text{кін}}$ зміряних в режимі «ГАЛЬМУВАННЯ». Початкова швидкість гальмування ($V_{\text{поч}}$) і кінцева швидкість ($V_{\text{кін}}$), при якій проводиться відлік значення ПУ, вибираються із значень $V_{\text{поч}} \leq 27$ км/год; $V_{\text{кін}} \geq 6$ км/год.

Проведення метрологічного контролю каналу ПУ проводиться методом порівняння із зразковою мірою, в якості якої використовується електронна метрологічна модель процесів, що мають місце при натурних вимірюваннях ПУ. Для створення метрологічно достовірної моделі зібрати схему (рис. 4), яка забезпечує виконання наступних дій:

- дискретна зміна частоти появи імпульсів, що імітують роботу фотодатчиків, від значення $V_1 \geq 1,05V_{\text{поч}}$ до $V_2 \leq 0,9V_{\text{поч}}$ (процес гальмування роликів);

- імітацію уповільнення з різними його значеннями (можливість регулювання і метрологічного контролю) шляхом комутації значення кінцевої швидкості за відомий інтервал часу, з яким і порівнюється значення ПУ, що відображається на пульті ВС.

Дії по проведенню МК каналу вимірювання ПУ містять наступні операції.

Встановити значення частоти вихідних сигналів генераторів «А», «Б», «В» рівної, відповідно:

$$f_A = 1,05 \cdot 20V_{\text{поч}} \text{ (для } V_{\text{поч}} = 27 \text{ км/год} - f_A = 765 \text{ Гц);}$$

$$0,95 \cdot 20V_{\text{поч}} \leq f_B \leq 1,05 \cdot 20V_{\text{поч}} \text{ (для } V_{\text{кін}} = 6 \text{ км/год} - 513 \leq f_B \leq 126 \text{ Гц);}$$

$$f_B = 0,95 \cdot 20V_{\text{кін}} \text{ (для } V_{\text{кін}} = 6 \text{ км/год} - f_B = 114 \text{ Гц).}$$

Включити пульт, натиснути кнопку «Вим.» (рис. 4) і утримувати її до моменту переключення вимірювальної системи пульта в режим «гальмування – вимірювання ПУ». Після цього відпустити кнопку «Вим.».

Зафіксувати значення ПУ пульта і ПУ зразкового хронометра ЧЗ-34 (рис. 4). Вимірювання повторити не менше 10 разів, варіюючи частотою генераторів «А», «Б», «В», «Г» (значення частоти генератора «Г» обчислюється, як $f_G = \frac{10^3}{\text{ПУ}_{\text{розр.}}}$).

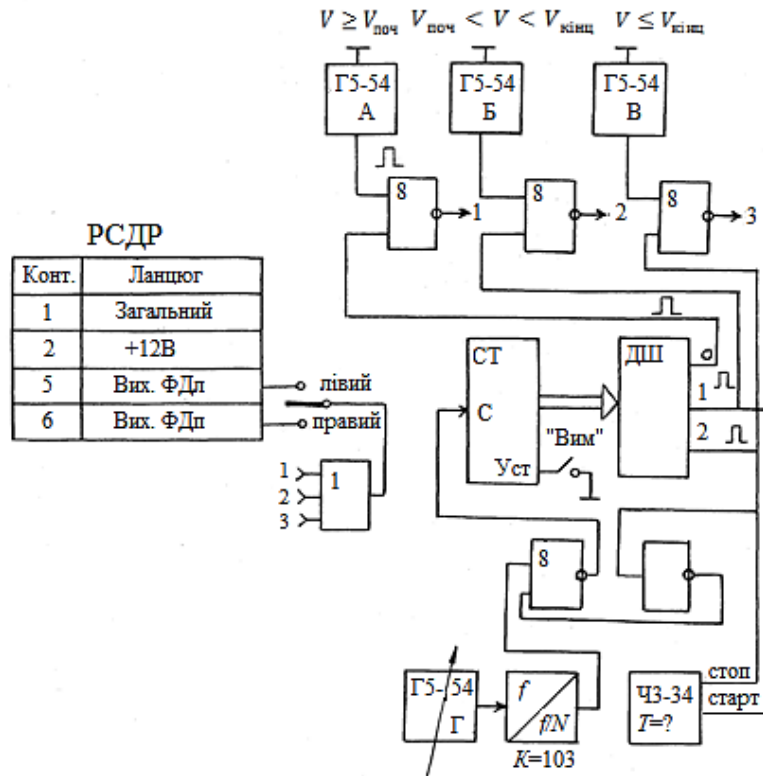


Рисунок 4 – Схема метрологічного контролю каналу ПУ

Повторити виміри для лівого і правого каналів стенду, перемикаючи їх за допомогою тумблера «лівий-правий» (рис. 4).

Розрахувати за даними вимірювань величини:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}, \quad (15)$$

де δ_i – відносна різниця показань вимірювальної системи і зразкового хронометра, що розрахована як $\delta_i = \frac{\Delta_i}{\text{ПУ}_3}$,

Δ_i – різниця величин $\text{ПУ}_{\text{вс}}$ і ПУ_3 ; ($\text{ПУ}_{\text{вс}}$ – показання індикатора «показник уповільнення» вимірювальної системи пульта, ПУ_3 – показник уповільнення, що відображається на зразковому приладі ЧЗ-34 (рис. 4)).

$$\Sigma_{\text{пу}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}}. \quad (16)$$

Прийняти рішення про придатність каналу вимірювання ПУ до експлуатації. Критерії

придатності:

$$\Sigma_{\text{пу}} \leq 8 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \bar{\delta} \leq 0,02. \quad (17)$$

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інерційний роликовий стенд пересувної діагностичної станції відноситься до категорії експериментального (дослідного) зразка діагностичного обладнання. Він спроектований в результаті науково-дослідних та науково-конструкторських робіт, які виконуються у ХНАДУ на кафедрі технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. Говорущенко М.Я. Вимірювальна система роликового стенда відноситься до нестандартних засобів вимірювальної техніки, для яких немає потреби у проведенні державних випробувань. Однак на перспективу таке обладнання може з успіхом використовуватися у проведенні технічних оглядів у складі мобільних станцій діагностики та при проведенні наукових досліджень. Розроблена конструкція стенда може бути передана в експлуатацію та виробництво, як альтернатива серійним силовим гальмівним стендам.

В цьому випадку треба проводити періодичну метрологічну атестацію такого обладнання з метою визначення метрологічних характеристик та встановлення придатності обладнання до застосування [13, 14].

ВИСНОВКИ

1. В умовах тенденції збільшення кількості легкових автомобілів та перспективи повернення періодичного технічного огляду необхідно вдосконалення та розвиток системи, методів та контрольно-діагностичного обладнання для оцінки технічного стану автомобілів у різних умовах їх дислокації та експлуатації.

2. Альтернативою стаціонарним пунктів технічного огляду можуть бути мобільні станції діагностики, які потрібно оснастити якісним обладнанням, до яких відносяться роликові гальмівні стенди інерційного типу. Особливості конструкції такого стенда висувають специфічні вимоги до конструкції вимірювальної системи.

3. В залежності від прийнятих алгоритмів і методик реєстрації діагностичних параметрів необхідно розробляти відповідні методики метрологічного контролю вимірювальної системи.

4. Розроблені методики перевірки каналів вимірювання гальмівних параметрів автомобілів на інерційному роликовому стенді дозволяють розробити програму періодичної метрологічної атестації при проведенні сертифікації обладнання органами Держстандарту України.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Соломаха І., Раскін В. (2023). Аналіз та прогноз розвитку автомобільного парку України: відокремлення реальності від реєстрації та системний погляд на майбутнє. Проблеми і перспективи економіки та управління, 4 (36), 165-173. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-4\(36\)-165-173](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-4(36)-165-173).

2. На початок 2023 року середній вік автівок в Україні становить 23 роки. URL: <https://skilky-skilky.info/na-pochatok-2023-roku-seredniy-vik-avtivok-v-ukraini-stanovyt-23-roky/>.

3. Павлова І., Самостян В., Дембіцький, В. (2024). Факторний аналіз формування мережі підприємств мобільного автосервісу. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 1(22), 269-278. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1369>.

4. Говорущенко М.Я., Волков В.П., Рабінович Е.Х., Мармут І.А., Зуєв В.О. (2009). Роликові стенди для перевірки гальмівних та тягових властивостей автомобілів (теорія, розрахунок та конструювання): монографія. Харків: ХНАДУ, 344 с.

5. Мармут І.А. (2018). Математичні моделі стендової діагностики гальмівних систем автомобілів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. Луцьк, 2(11), 90-96.

6. Мармут І.А. (2020). Розробка методики повірки системи вимірювання потужності на роликовому стенді пересувної діагностичної станції легкових автомобілів. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. Науковий журнал ХНТУСГ, 22, 19-26.

7. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. ДСТУ 3649:2010. [Чинний від 2011-07-01]. Київ, Держспоживстандарт України, 2011. 28 с. (Національні стандарти України).

8. Стенди роликові для перевірки гальмівних систем дорожніх транспортних засобів в умовах експлуатації. Загальні технічні вимоги. ДСТУ 3333-96. [Чинний від 1997-01-01]. Київ, Держстандарт України, 1996. 11 с. (Національні стандарти України).

9. Measure of Angular Velocity. URL: <https://www.scribd.com/document/255395227/Measure-of->

Angular-Velocity.

10. Alan S. Morris and Reza Langari. (2012). Measurement and Instrumentation. Theory and Application. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-12-381960-4. DOI <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63052-X>.
11. Ramazan Akkaya, Fatih Alpaslan Kazan. (2020). A New Method for Angular Speed Measurement with Absolute Encoder. Elektronika ir elektrotechnika, ISSN 1392-1215, VOL. 26, № 1. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.26.1.25307>.
12. P. Sapkota, N. Pokharel, R. Silwal, S. Chitrakar, H.P. Neopane, B. Thapa. (2023). Rotational Speed Measurement of a Shaft Using Infrared Sensor with NI Data Acquisition system and LabVIEW. Journal of Physics: Conference Series. 2629. 012020. doi:10.1088/1742-6596/2629/1/012020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2629/1/012020/pdf>.
13. Технічний регламент законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 13 січня 2016 р. № 94. Редакція від 27.09.2024. Офіційний портал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/94-2016-%D0%BF#Text>.
14. Закон України № 1314-VII «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 5 червня 2014 р. Редакція від 15.11.2024. Офіційний портал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/94-2016-%D0%BF#Text>.
15. B.D. Hall, M. Kuster. (2021). Metrological support for quantities and units in digital systems. Measurement: Sensors, Volume 18, December, 100102. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100102>.
16. Мирошниченко Ю. (2022). Методика розробки метрологічного забезпечення технічного обслуговування за станом засобів зв'язку. Збірник «Інформаційні технології та безпека», 10(1), 108-121. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261191>.
17. Мотало В.П. (2019). Аналіз методик верифікації та калібрування засобів вимірювальної техніки. Вимірювальна техніка та метрологія. 80(1), 51-66. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.01.051>.
18. Володарський Є.Т., Потоцький І.О. (2019). Забезпечення метрологічної надійності вимірювань. Вимірювальна техніка та метрологія, 80(3), 5-9. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.005>.
19. Мотало В., Черешневська А. (2018). Аналіз показників якості вимірювань. Вимірювальна техніка та метрологія, 79(2), 35-41. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.02.035>.
20. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О., Ванько В.М., Бойко Т.Г. (2003). Метрологія та вимірювальна техніка: підручник. Львів: «Бескид Біт», 544 с. ISBN: 966-96071-8-3.

REFERENCES

1. Solomakha I., Raskin V. (2023). Analiz ta prohnoz rozvytku avtomobilnoho parku Ukrainy: vidokremlennia realnosti vid reiestratsii ta systemnyi pohliad na maibutnie. [Analysis and forecast of the development of the automobile fleet of Ukraine: separation of reality from registration and a systemic view of the future]. Problemy i perspektyvy ekonomiky ta upravlinnia. Problems and prospects of economics and management, 4 (36), 165-173. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-4\(36\)-165-173](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-4(36)-165-173).
2. Na pochatok 2023 roku serednii vik avtivok v Ukraini stanovy 23 roky. [At the beginning of 2023, the average age of cars in Ukraine is 23 years]. [in Ukrainian]. URL: <https://skilky-skilky.info/na-pochatok-2023-roku-seredniy-vik-avtivok-v-ukraini-stanovy-23-roky/>.
3. Pavlova I., Samostian V., Dembitskyi V. (2024). Faktorny analiz formuvannia merezhi pidpriemstv mobilnoho avtoservisu. [Factor analysis of the formation of a network of mobile car service enterprises]. Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyy zhurnal. Modern technologies in mechanical engineering and transport. Scientific journal, 1(22), 269-278. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1369>.
4. Govorushchenko N., Volkov V., Rabinovich E., Marmut I., & Zuiev V. (2009). Rolykovi stendy dlya perevirky hal'mivnykh ta tyahovykh vlastyvostry avtomobiliv. [Roller stands for testing brake and traction properties of cars (theory, calculation and design)]. Monograph. Kharkov: KhNAHU [in Ukrainian].
5. Marmut I. (2018). Matematychni modeli stendovoi diahnostryky halmivnykh system avtomobiliv. [Mathematical models of bench diagnostics of car braking systems]. Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyy zhurnal. Modern technologies in mechanical engineering and transport. Scientific journal, 2(11), 90-96. [in Ukrainian]. <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/issue/view/22>.
6. Marmut I. (2020). Rozrobka metodyky povirky systemy vymiriuvannia potuzhnosti na rolykovomu

stendi peresuvnoi diahnostychnoi stantsii lehkovykh avtomobiliv. [Development of a methodology for verifying the power measurement system on a roller stand of a mobile diagnostic station for passenger cars]. Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv. Naukovyi zhurnal KhNTUSH. Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes. Scientific journal, 22, 19-26. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37700/ts.2020.22.19-26>.

7. Kolisni transportni zasoby. Vymohy shchodo bezpechnosti tekhnichnoho stanu ta metody kontroliuvannya. [Wheeled vehicles. Requirements for the safety of the technical condition and control methods]. (2011). DSTU 3649:2010 from 01 July 2011. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukraine [in Ukrainian].

8. Stendy rolykovi dlia perevirky halmivnykh system dorozhnikh transportnykh zasobiv v umovakh ekspluatatsii. Zahalni tekhnichni vymohy. [Roller stands for testing brake systems of road vehicles in operating conditions. General technical requirements]. (1996). DSTU 3333-96 from 01 January 1997. Kyiv: Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian].

9. Measure of Angular Velocity. URL: <https://www.scribd.com/document/255395227/Measure-of-Angular-Velocity>.

10. Alan S. Morris and Reza Langari. (2012). Measurement and Instrumentation. Theory and Application. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-12-381960-4. DOI <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63052-X>.

11. Ramazan Akkaya, Fatih Alpaslan Kazan. (2020). A New Method for Angular Speed Measurement with Absolute Encoder. Elektronika ir elektrotechnika, ISSN 1392-1215, VOL. 26, № 1. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.26.1.25307>.

12. P. Sapkota, N. Pokharel, R. Silwal, S. Chitrakar, H.P. Neopane, B. Thapa. (2023). Rotational Speed Measurement of a Shaft Using Infrared Sensor with NI Data Acquisition system and LabVIEW. Journal of Physics: Conference Series. 2629. 012020. doi:10.1088/1742-6596/2629/1/012020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2629/1/012020/pdf>.

13. Tekhnichniy rehlement zakonodavcho rehulovanykh zasobiv vymiriuvanoi tekhniki. [Technical regulation of legally regulated measuring equipment]. (2024, September 27). Ofitsiinyi portal Verkhovnoi Rady Ukrainy. – The official portal of the Verkhovna Rada of Ukraine. [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/94-2016-%D0%BF#Text>.

14. Zakon Ukrainy № 1314-VII «Pro metrolohiuu ta metrolohichnu diialnist» vid 5 chervnia 2014 r. [Law of Ukraine № 1314-VII "On metrology and metrological activity" dated June 5, 2014]. (2024, November 15). Ofitsiinyi portal Verkhovnoi Rady Ukrainy. – The official portal of the Verkhovna Rada of Ukraine. [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/94-2016-%D0%BF#Text>.

15. B.D. Hall, M. Kuster. (2021). Metrological support for quantities and units in digital systems. Measurement: Sensors, Volume 18, December, 100102. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100102>.

16. Myroshnychenko Y. (2022). Metodyka rozrobky metrolohichnoho zabezpechennia tekhnichnoho obsluhovuvannya za stanom zasobiv zviazku. [Development methodology of metrological support of maintenance by the technical state of communication means]. Zbirnyk «Informatsiini tekhnolohii ta bezpeka». Collection "Information Technology and Security", 10(1), 108-121. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261191>.

17. Motalo V. (2019). Analiz metodyk veryfikatsii ta kalibruvannya zasobiv vymiriuvanoi tekhniki. [Analysis of verification and calibration methodologies of measuring instruments]. Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. Measuring technique and metrology. 80(1), 51-66. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.01.051>.

18. Volodarsky E., Pototskiy I. (2019). Zabezpechennia metrolohichnoi nadiinosti vymiriuvan. [Ensuring metrological reliability of measurements]. Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. Measuring technique and metrology. 80(3), 5-9. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.005>.

19. Motalo V., Chereshevskaya A. (2018). Analiz pokaznykiv yakosti vymiriuvan. [Analysis of the measurement quality indexes]. Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. Measuring technique and metrology, 79(2), 35-41. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.02.035>.

20. Polishchuk Ye.S., Dorozhovets M.M., Yatsuk V.O., Vanko V.M., Boiko T.H. (2003). Metrolohiia ta vymiriuvalna tekhnika. [Metrology and measuring technology]. Textbook. Lviv. [in Ukrainian]. ISBN: 966-96071-8-3.

I. Marmut, S. Shestov. Improvement of the method of checking the channels for measuring the braking parameters of vehicles on the inertial roller stand.

In the conditions of a stable trend, the increase in the number of rolling stocks, primarily due to the passenger cars of individual owners, will require increased attention to the control of technical condition in the future. This applies to car systems that affect road safety. The key of such systems is the braking system. A qualitative check of the technical condition can be carried out with the help of tools (stands). In operational diagnostics, power stands for diagnosing braking systems are the most common. As various studies show, more reliable information about the condition of the braking system can be obtained with the help of inertial roller stands.

Also, such equipment can be used in conducting research. This is due to the fact that the inertial method of diagnosing the brake system allows simulating the actual temperature and speed regimes of the brake system. Therefore, the issue of creating high-quality diagnostic equipment is urgent.

Another argument for using the inertial method of checking braking systems on high-speed stands is the possibility of fully checking modern braking systems that are equipped with ABS.

The inertial roller stand has other principles of implementation and structure of the measuring system. An important principle for the measuring system is to ensure the necessary accuracy of registration of diagnostic parameters. It is also determined by the requirements of the relevant standards for such equipment. The metrological characteristics of the measuring system of the roller stand are determined by the type of the primary sensor. In addition, an important aspect is the issue of periodic metrological certification of measuring equipment.

The article examines the methods of checking the channels of the measuring system of the inertial roller stand, which was created at the KhNAHU at the department of technical operation and service of cars named after Govorushchenko M.Ya. and is part of a mobile car diagnostic station. The main parameters characterizing the condition of the braking system are permanent deceleration, activation time, braking distance, and the time of activation of the device for pressing the brake pedal.

The developed methods of metrological inspection of the channels of the measuring system allow for the development of a program of periodic inspection of measuring equipment by standardization bodies.

Keywords: roller stand, braking system, permanent deceleration, activation time, braking distance, metrological control.

МАРМУТ Ігор Арнольдович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. Говорущенко М.Я., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: mia2005.62@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-4661-1336>.

ШЕСТОВ Сергій Олександрович, аспірант кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. Говорущенко М.Я., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: sergey.shestov777@gmail.com.

Ihor MARMUT, Ph. D. in Engineering, Associate Professor of Technical Operation and Service of Cars Department named after Govorushchenko M.Ya., Kharkov National Automobile and Highway University, e-mail: mia2005.62@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-4661-1336>.

Serhii SHESTOV, Postgraduate of Technical Operation and Service of Cars Department named after Govorushchenko M.Ya., Kharkov National Automobile and Highway University, e-mail: sergey.shestov777@gmail.com.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1733

Мельник Р.В., Цимбал С.В.

*Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна***ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: BLOCKCHAIN ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ЛОГІСТИЦІ ТА АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ**

У статті розглядається застосування технології blockchain у сфері логістики та управління ланцюгами поставок, а також ознайомимося з основними світовими трендами у цій галузі. Технологія blockchain – це інноваційна технологія, яка дозволяє створювати надійні та прозорі системи запису, зберігання та передачі інформації. У логістиці та керуванні ланцюгами поставок, так як інтеграція ключових бізнес-процесів потребує надійної інформаційної підтримки. Blockchain може забезпечити таку підтримку, забезпечуючи прозорість та моніторинг актуальної інформації.

Метою статті є вивчення та аналіз застосування технології blockchain у сфері логістики та автомобільних перевезень, оскільки дані інноваційні технології здатні оптимізувати та покращувати процеси в ланцюгах постачання, а також в управлінні вантажними перевезеннями, і в тому числі підвищувати ефективність логістичних операцій.

Також у статті детально розглядаються приклади застосування технології blockchain в передових компаніях, включаючи роздрібну торгівлю, та наведено основні переваги. Таким чином, робиться висновок, що технології blockchain мають великий потенціал для цифровізації логістики та управління ланцюгами постачань, які і забезпечують надійність, прозорість та ефективність взаємодії між різними учасниками ланцюга постачань, а також підвищують довіру покупців до процесу купівлі та доставки товарів.

Ключові слова: постачання, технологія blockchain, штучний інтелект, логістика, автомобільні перевезення, передача інформації, цифровізація.

ВСТУП

Логістична галузь відіграє ключову роль у полегшенні переміщення товарів та послуг по всьому світу. Проте традиційні системи управління ланцюгами постачання часто стикаються з проблемами, пов'язаними з прозорістю, моніторингом та ефективністю. Ці проблеми можуть призвести до збільшення експлуатаційних витрат, затримок та відсутності довіри між різними зацікавленими сторонами, залученими до ланцюга постачань.

З появою blockchain та технологій штучного інтелекту з'являється все більше можливостей для вирішення цих проблем та відкриття нових можливостей для управління логістикою.

Blockchain, як децентралізована і незмінна система обліку, має потенціал для підвищення прозорості, захисту даних та забезпечення надійних транзакцій між сторонами без необхідності у посередниках. З іншого боку, штучний інтелект надає алгоритми машинного навчання та можливості прогнозувальної аналітики, які дозволяють оптимізувати процеси прийняття рішень, прогнозувати попит та підвищувати загальну ефективність ланцюга постачань.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Свого роду співпраця технології blockchain та штучного інтелекту є привабливим підходом до модернізації логістичних операцій та створення більш упорядкованої, прозорої та безпечної екосистеми ланцюга постачань. Поєднуючи сильні сторони обох технологій, це дослідження спрямоване на вивчення потенційного перетворюючого впливу на логістичні процеси, починаючи від відстеження вантажів і управління запасами та закінчуючи оптимізацією ресурсів та аналізом даних у режимі реального часу [1].

Представлено всебічний огляд поточного стану технологій blockchain та штучного інтелекту у логістичній галузі. У ньому розглядаються ключові особливості та переваги нової логістичної платформи, яка використовує прозорість та незмінність технології blockchain у поєднанні з можливостями ухвалення рішень на основі даних штучного інтелекту.

Крім того, розглядаються тематичні дослідження компаній, які успішно впроваджують логістичні рішення на базі blockchain та штучного інтелекту, щоб підкреслити практичну здійсненність та переваги цього підходу.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Цілями даного експерименту є:

1. Зрозуміти ключові проблеми, з якими стикається логістична галузь, та їх потенційний вплив на управління ланцюгами постачання.
2. Проаналізувати окремі сильні сторони технологій blockchain і штучного інтелекту та їхню значимість для сфери логістики.

3. Вивчити синергетичні ефекти об'єднання технології blockchain та штучного інтелекту в логістичних операціях для досягнення підвищеної прозорості, ефективності та надійності.

4. Оцінити практичну реалізацію логістичних рішень на базі технології blockchain та штучного інтелекту за допомогою реальних кейсів.

5. Подати концептуальну модель єдиної логістичної платформи, яка об'єднує технології blockchain, штучний інтелект та смарт-контракти для безперебійного керування ланцюгами постачання.

Штучний інтелект (ШІ) означає здатність комп'ютерних систем виконувати творчі завдання, які колись розглядалися виключно у рамках людських здібностей.

Прогнози науковців показують, що до 2030 року інтеграція штучного інтелекту може стати каталізатором зростання світового валового внутрішнього продукту (ВВП) на 14%. Цей показник перевищує сукупний обсяг промислового виробництва Індії та Китаю.

Україна також може зробити істотний внесок у сферу штучного інтелекту завдяки своїй стратегії розвитку штучного інтелекту, спрямованій на сприяння ефективному співробітництву між урядом, бізнесом та громадянами [2].

Штучний інтелект дає безліч переваг:

1. Багатогранне виконання завдань: штучний інтелект прискорює та підвищує точність виконання завдань, які традиційно вимагають значних витрат часу та зусиль, переважаючи над можливостями людини.

2. Майстерність у обробці даних: штучний інтелект вміло керує великими наборами даних, виявляючи закономірності, приймаючи обґрунтовані рішення та незалежно виконуючи завдання, що призводить до суттєвої економії часу.

3. Потенціал співробітництва: штучний інтелект співпрацює з людьми, посилюючи їх можливості та розширюючи кругозір.

Стратегічний поворот у бік послуг, особливо за допомогою сегментації ланцюга постачання та розвитку сервісних центрів, стає ключовим аспектом управління ланцюгом постачання. Сервісні центри беруть на себе значні обов'язки щодо планування та контролю в рамках ланцюгів постачання. Їхня місія полягає у забезпеченні дотримання взаємно встановлених угод про рівень обслуговування у межах логістичних ланцюжків. Сервісні центри вміло обробляють глобальну логістичну інформацію в режимі реального часу, забезпечуючи швидке реагування та прийняття зважених рішень.

Оптимізація логістики знаходить надійну підтримку у програмних засобах. Ці інструменти оптимізують різні аспекти ланцюгів постачання. Область проектування оптимальних структур ланцюгів постачання розширюється завдяки цілому ряду інструментів оптимізації, що використовують сценарне та імітаційне моделювання визначення оптимальних конфігурацій ланцюгів. Велика кількість програмних продуктів спрощує управління запасами та виробничими процесами.

Область оптимізації, заснована на методологіях дослідження операцій, є зрілим та розвиненим сектором управління ланцюгами постачання. Ці методології та інструменти оптимізації допомагають компаніям у зниженні витрат, підвищенні ефективності та загальному вдосконаленні управління ланцюгами постачання.

Підвищення стійкості ланцюга постачання включає ефективні процеси управління поверненням, зворотною логістикою, переробкою відходів, енергозбереженням та впровадженням "зеленої" логістики". Ці ініціативи не тільки зменшують вплив на навколишнє середовище та накопичення відходів, а й призводять до значного зниження витрат. Ефективно розроблена стійка мережева структура, підкріплена плануванням та оптимізацією, дозволяє фахівцям із планування визначати ресурсоефективні та екологічні структури ланцюга постачання [3]. Цифрова трансформація в ланцюгах постачання спрямована на надання точної інформації про найважливіші бізнес-процеси в режимі реального часу, виявлення аномалій, областей, схильних до ризику, та оптимізацію параметрів для досягнення соціально-економічних цілей. Компанії, оснащені передовими цифровими ланцюгами постачання, можуть розумно розподіляти ресурси, активи, персонал та товарно-матеріальні запаси, оперативно реагуючи на транспортні та виробничі потреби, зрештою скорочуючи витрати і підвищуючи оперативну гнучкість.

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) у сфері вантажних перевезень відкриває безліч переваг та можливостей, тим самим дозволяючи оптимізувати та автоматизувати процеси. Нижче наведено деякі ключові переваги, пов'язані з використанням штучного інтелекту при вантажних перевезеннях:

1. Рекомендаційні системи для оптимізації автопарку: впровадження штучного інтелекту полегшує аналіз даних про вантажні перевезення, прогнозування обсягів відвантаження та визначення оптимальної кількості та типів транспортних засобів для виконання поставлених задач. Це підвищує ефективність використання автопарку та знижує витрати.

2. Оптимізація маршруту: штучний інтелект знаходить застосування у оптимізації маршруту та розподілі вантажу між транспортними засобами. Враховуючи такі фактори, як час доставки, витрати на паливо, затори на дорогах та погодні умови, штучний інтелект скорочує час доставки, сприяє економії коштів та підвищує операційну ефективність.

3. Прогнозування попиту та управління запасами: штучний інтелект ретельно вивчає історичні дані, що стосуються попиту на вантажні перевезення, тенденцій ринку та інших змінних, щоб прогнозувати майбутній попит та оптимізувати рівень запасів. Це дозволяє підприємствам більш точно планувати та прогнозувати попит, мінімізувати дефіцит чи надлишки та оптимізувати процеси управління запасами.

4. Прогнозування та запобігання поломкам: штучний інтелект аналізує дані про стан транспортного засобу, виявляючи неминучі поломки чи необхідність технічного обслуговування. Отже, це допомагає запобігати нещасним випадкам і скорочувати час простою транспортних засобів через поломки.

5. Підвищення безпеки дорожнього руху: штучний інтелект аналізує дані з датчиків та камер, встановлених на транспортних засобах, для виявлення небезпечних ситуацій, попереджаючи водіїв про потенційні ризики. Більше того, штучний інтелект оцінює поведінку водія та надає рекомендації щодо підвищення безпеки дорожнього руху.

6. Автоматизація процесів: штучний інтелект автоматизує рутинні операції та завдання управління під час перевезення вантажів. Наприклад, це допомагає відстежувати робочий час водія, контролювати витрати на паливо та формувати звіти, усуваючи необхідність у ручному виконанні цих завдань. Це підвищує ефективність та зводить до мінімуму ймовірність помилок.

7. Визначення оптимального ціноутворення: штучний інтелект допомагає підприємствам встановлювати оптимальні ціни на вантажні перевезення, аналізуючи такі фактори, як попит, пропозиція, конкуренція та транспортні витрати. Це дозволяє підприємствам встановлювати конкурентоспроможні ціни, максимізувати прибуток та залучати більше клієнтів.

8. Управління ресурсами та оптимізація часу: штучний інтелект аналізує робоче навантаження водія, перерви та час відпочинку, щоб визначити оптимальний розподіл завдань та робочих графіків. Це підвищує ефективність роботи, знижує втому водія і, зрештою, знижує ризик аварій та дорожньо-транспортних пригод.

9. Індивідуальні послуги для клієнтів: використовуючи штучний інтелект, підприємства можуть аналізувати переваги та потреби клієнтів, щоб пропонувати індивідуальні послуги. Це включає надання спеціальних знижок або рекламних акцій для постійних клієнтів і надання індивідуальних рішень для певних типів вантажів. Отже, підвищується рівень задоволеності клієнтів, що сприяє встановленню довгострокових партнерських відносин.

10. Обробка великого обсягу даних: штучний інтелект та машинне навчання відіграють важливу роль в обробці та аналізі великого обсягу даних, що надходять з датчиків транспортних засобів, GPS-трекерів та інших джерел. Це дає підприємствам цінну інформацію для прийняття стратегічних рішень, оптимізації процесів та підвищення якості обслуговування.

Сучасні цифрові технології значно змінили ланцюги постачання, при цьому ключову роль відіграють такі рішення, як GPS-відстеження, радіочастотна ідентифікація (RFID), штрих-коди, смарт-етикетки, дані на основі позиціонування та бездротові сенсорні мережі. Крім того, хмарні технології та blockchain, інтегровані з веб-сервісами, мають потенціал для уніфікації інформації та процесів, забезпечуючи прозорість та простежуваність.

З точки зору управління ланцюги постачання, blockchain вирішує одну з найскладніших проблем: забезпечення безпеки, прозорості та довіри при обміні інформацією між зацікавленими сторонами. Для досягнення цієї мети кожна транзакція та передача інформації проходять ряд етапів контролю, що охоплюють оподаткування, фінанси, митницю та інші форми перевірки. Це необхідно для забезпечення точності, справжності та відповідності стандартам якості та умовам контракту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Blockchain є децентралізованим реєстром всіх транзакцій, доступним всім учасникам одночасно. Це забезпечує прозорість та узгодженість даних. Blockchain забезпечує незмінність історії транзакцій. Кожен блок у ланцюгу посиляється на попередній блок, і зміна інформації у blockchain

потребує зміни всіх наступних блоків. Це гарантує безпеку та надійність, оскільки будь-яка спроба змінити дані стає помітною та блокується [4].

Крім того, різні застосування blockchain в логістиці включають:

1. Покращене відстеження продукції: використовуючи blockchain, можна створити прозору та надійну систему відстеження всіх етапах ланцюга постачання. Це допомагає запобігти проблемам, пов'язаним з втратою або заміною товарів, а також спрощує взаємодію між учасниками логістичного ланцюжка.

2. Смарт-контракти для автоматичних платежів: смарт-контракти можуть автоматизувати виконання платежів на основі певних умов, таких як доставка товарів у призначений час та у вказане місце. Це знижує ризики шахрайства, прискорює обробку платежів та спрощує процедури розрахунків.

3. Автоматизоване страхування вантажів: blockchain та смарт-контракти можуть автоматизувати процеси страхування, відстежуючи претензії та полегшуючи виплату страхових відшкодувань. Це спрощує видачу страхового поліса та процес врегулювання претензій.

4. Цифрове сховище документів: blockchain може бути цифровим сховищем документації, такої як сертифікати походження, санітарно-гігієнічні сертифікати та інші документи, які необхідні для перевезення вантажів. Це спрощує обмін документами та прискорює митні та інші процедури контролю.

5. Децентралізована платформа для обміну вантажами: blockchain може створити децентралізовану платформу, де вантажовідправники та перевізники можуть взаємодіяти без посередників. Така платформа могла б спростити пошук відповідних вантажів та перевізників, запропонувати конкурентоспроможні ціни та прискорити укладання угод.

Поява технології blockchain обіцяє революціонізувати глобальний бізнес завдяки її принципу децентралізованого розподіленого зберігання даних та безперервної, незмінної історії транзакцій. Використання blockchain за допомогою смарт-контрактів забезпечує швидкий зворотній зв'язок та автоматизацію процесів, що робить необхідним для підприємців підготуватись до цієї нової реальності. Невиконання цієї вимоги може призвести до виключення з ринку, що швидко розвивається, і недопущення потенційних можливостей blockchain [5].

Однак, незважаючи на те, що фінансові розрахунки були одними з найбільш ранніх прикладів використання технології blockchain, респонденти також виділили кілька інших додатків, які демонструють універсальність технології. До них відносяться управління даними, інтернет речей, смарт-контракти та інші області. Примітно, що логістика та управління ланцюгами постачання привернули особливу увагу, підкресливши швидке зростання можливостей blockchain поза фінансового сектора.

Простіше кажучи, blockchain – це цифровий, децентралізований та публічний реєстр транзакцій. Одна з ключових відмінностей технології blockchain від інших систем полягає у процесі верифікації кожної транзакції. Досягнення "консенсусу" щодо транзакцій є важливою характеристикою технології blockchain, що дозволяє здійснювати прямі однорангові транзакції без посередників. Цей процес обіцяє зміцнити довіру, зменшити витік цінності в ланцюгах постачання та забезпечити чесну конкуренцію. Перевірені транзакції записуються в незмінний реєстр, який розподіляється між учасниками логістичного ланцюга в процесі постачання, такими як підприємства або контрагенти. Кожен учасник має свою копію журналу транзакцій, тому будь-яка зміна в одному реєстрі зробить його несумісним з іншими, тому процес виключає можливість втручання в журнал транзакцій, тому що всі учасники можуть бачити всі транзакції, так як blockchain забезпечує прозорість для всіх контрагентів.

У логістиці та управлінні ланцюгами постачання технологія blockchain має потенціал для революційних змін. Вона може значно полегшити та прискорити операції для всіх контрагентів, забезпечуючи оптимізований потік інформації [6].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Давайте розглянемо приклад відправлення партії тюльпанів із Голландії до Сінгапуру. У цьому випадку, процес доставки включає кілька складів та різні види транспорту. Вантажівка забирає тюльпани з голландської ферми та доставляє їх у розподільний центр. З використанням технології blockchain, всі контрагенти можуть переглядати кожну транзакцію в процесі відвантаження та доставки без необхідності витрачати багато часу на узгодження. Це дозволяє зробити оплату за перевезення негайно після поновлення бухгалтерської книги, яка підтверджує прибуття вантажу на склад. Усі учасники мають доступ до цієї інформації, і кожна транзакція записується до blockchain,

що забезпечує прозорість та недвозначність. Це спрощує фінансові операції та мінімізує ризики, пов'язані з оплатою та підтвердженням доставки.

У сфері логістики прикладом застосування технології blockchain може бути відправлення партії тюльпанів з Нідерландів до Сінгапуру, що включає кілька етапів та складів. Використовуючи blockchain, усі зацікавлені сторони в ланцюгу постачань можуть отримати доступ до записів кожної транзакції, пов'язаної з вантажем, та довіряти їм. Наприклад, під час навантаження квітів на контейнеровоз контроль температури у холодильних установках можна контролювати за допомогою датчиків. Відхилення від встановлених умов транспортування, що призводять до порушення температурного режиму, можуть призвести до штрафних санкцій. Такі порушення автоматично фіксуються, про що негайно повідомляються страхові компанії. Вся інформація про стан вантажу, включаючи дані датчиків, доступна всім учасникам, що дозволяє своєчасно оновлювати інформацію про стан вантажу та необхідні дії. Blockchain забезпечує прозорість та ефективність ланцюжка поставок, оптимізуючи процеси узгодження та скорочуючи час роботи.

Інтеграція технології blockchain у промислові підприємства може автоматично захистити їх від підробок, оскільки шахрайські транзакції не можуть бути зареєстровані у розподіленому реєстрі [7].

У контексті управління ланцюжками поставок існують три ключові аспекти, які роблять технологію blockchain цінною:

1. Захищені перевірені записи транзакцій: це передбачає наявність надійної та незмінної версії записів транзакцій, що є основою для підтвердження справжності та достовірності інформації.

2. Партнерські відносини: партнерство між цими організаціями демонструє приклад використання blockchain в SCM. Використовуючи blockchain, вони відстежують ланцюг постачань продуктів, щоб забезпечити прозорість та справжність на всіх етапах, від виробництва до доставки споживачеві.

Основною метою цього партнерства є вивчення можливості впровадження технології blockchain для відстеження ланцюга постачання харчових продуктів з метою підвищення прозорості та безпеки. Blockchain можна використовувати для забезпечення достовірності даних про походження та стан продукту, якими діляться всі зацікавлені сторони в процесі, включаючи виробників, постачальників, роздрібних торговців, регулюючі органи та споживачів.

Ціль розробки даних платформ є надання вантажним компаніям потужного та інтегрованого інструменту, що дозволяє автоматизувати та оптимізувати ключові процеси, що у свою чергу підвищує продуктивність та знижує витрати. Ці проекти активно використовують передові технології, такі як штучний інтелект, blockchain та смарт-контракти, щоб запропонувати інноваційні рішення для оптимізації логістики та підвищення ефективності. Платформи розробляються з урахуванням складнощів та викликів, з якими стикаються вантажні компанії, та надають широкий спектр функціональних можливостей.

Основні характеристики програмних продуктів включають [8]:

- CRM-функціонал, тобто створення та управління контактами, клієнтською базою даних, розкладом доставок та замовленнями. CRM-система дозволяє автоматизувати процеси взаємодії з клієнтами та підвищити якість обслуговування. Усі рутинні операції, такі як облік робочого часу, контроль витрати палива, формування звітів – автоматизовані.

- Прогнозування попиту та управління запасами - використання машинного навчання та алгоритмів прогнозування для аналізу та оптимізації вантажних перевезень. Система може пропонувати рекомендації щодо маршрутів, розподілу вантажів та оптимального використання автопарку. Враховуються різні фактори, такі як час доставки, вартість палива, пробки та погодні умови.

- Підтримка автопарку в оптимальному стані – ІІІ аналізує дані про стан вантажівок, дозволяє спрогнозувати наближення поломки і необхідність технічного обслуговування. Скорочується час вимушеного простою.

- Управління ресурсами та оптимізація робочого часу – платформа аналізує робітники навантаження, перерви та час відпочинку водіїв, щоб допомогти у визначенні оптимального розподілу завдань та графіків роботи, що дозволяє покращити ефективність роботи та знизити рівень втоми водіїв, що у свою чергу знижує ризик аварій.

- «Прозоре» переміщення вантажів – впровадження blockchain ланцюжків дозволяє забезпечити прозорість та безпеку ведення логістичних операцій на всіх етапах постачання. Усі транзакції, дані про вантажі, контракти та платежі записуються в blockchain, що забезпечує

надійність та незмінність інформації, що дозволяє запобігти проблемам, пов'язаним із втратою, заміною товарів, що спрощує взаємодію між учасниками логістичного ланцюжка.

- Впровадження смарт контрактів забезпечує автоматизацію та безпеку виконання контрактних зобов'язань, автоматизацію платежів. Смарт контракти автоматично виконуються при виконанні певних умов, що підвищує ефективність та надійність бізнес-процесів. Знижуються ризики шахрайства, скорочується час обробки платежів та спрощується процес розрахунків між сторонами.

- Цифрове зберігання документації – Blockchain рішення застосовують для зберігання документації, що супроводжує вантаж (сертифікат походження, санітарно-гігієнічні сертифікати, інша документація). Тим самим спрощується процес обміну документами та скорочується час на проходження митних та інших контрольних процедур.

ВИСНОВКИ

На закінчення, у даній роботі представлено всебічний аналіз застосування технології blockchain у галузі логістики та управління ланцюгами постачання. Дослідження пролило світло на потенційні переваги та вплив blockchain на логістичну галузь.

Результати цього дослідження показують, що технологія blockchain пропонує децентралізовану та прозору систему, яка може значно підвищити ефективність, безпеку та надійність операцій у ланцюгу постачання. Використовуючи розподілений реєстр blockchain та механізми консенсусу, зацікавлені сторони у логістичній екосистемі можуть отримувати інформацію про переміщення товарів у режимі реального часу, покращувати моніторинг та запобігати шахрайству.

Інтеграція blockchain з іншими технологіями, що розвиваються, ще більше розширює можливості управління логістикою. Смарт-контракти забезпечують автоматизоване та безпечне виконання угод, гарантуючи, що всі сторони виконують свої договірні зобов'язання без потреби у посередниках.

Тематичні дослідження компаній, які успішно впроваджують blockchain-рішення в логістику, продемонстрували відчутні переваги, такі як скорочення часу обробки, підвищення точності даних та підвищення довіри між партнерами по ланцюжку поставок.

Однак у цьому дослідженні також визнаються проблеми та складності, пов'язані з широким використанням blockchain в логістиці. Такі питання, як масштабованість, відповідність нормативним вимогам та необхідність стандартизації, вимагають ретельного розгляду та спільних зусиль з боку зацікавлених сторін галузі.

Майбутні дослідження в цій галузі мають бути зосереджені на вирішенні цих проблем, вивченні масштабованих рішень та розробці загальногалузових стандартів для інтеграції blockchain у логістику. Крім того, необхідні подальші дослідження для вивчення економічних та екологічних наслідків впровадження blockchain для логістичної галузі.

На закінчення, потенціал технології blockchain для революціонування сектора логістики та управління ланцюжками поставок незаперечний. Перетворювальна сила blockchain полягає в його здатності створювати децентралізовану, безпечну та прозору екосистему, яка підвищує довіру, ефективність та моніторинг по всьому ланцюгу постачань. Завдяки безперервним інноваціям та спільним зусиллям галузь логістики може використати весь потенціал технології blockchain і прокласти шлях до більш стійкого, ефективного та раціоналізаторського майбутнього.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Cerasis. «What Is Blockchain Technology, and What Is Its Potential Impact on the Supply Chain?», 2016 – URL: <http://cerasis.com/2016/06/29/blockchain-technology/>
2. Connecting to Compete 2016: Trade Logistics in the Global Economy. The Logistics Performance Index and Its Indicators. URL: https://wb-lpi-media.s3.amazonaws.com/LPI_Report_2016.pdf
3. Gonchar O., Zamkova N., Polishchuk I., Dovhan Y. & Sokolovska V. Oil and fat business of Ukraine: marketing orientation for achieving competitive advantages. European Journal of Sustainable Development. 2020. Vol. 9. No 4. P. 261–272. DOI: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n4p261>
4. Haq, I., Monfared, R.P., Harrison, R., Lee, L., and West, A. A new vision for the automation systems engineering for automotive powertrain assembly // International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2010. №23, pp.308-324
5. J. Ream, Y. Chu, and D. Schatsky. Upgrading blockchains: Smart contract use cases in industry // Deloitte University Press, 2019. № 02 (04), pp. 111.
6. PwC.com «Shifting patterns: The future of logistics industry», official report, 2020 – URL: <http://www.pwc.com/gx/en/industries/transportation-logistics/publications/the-future-of-the-logistics-industry.html>

7. Saveen A. Abeyratne, Radmehr P. Monfared. Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger // International Journal Of Research in Engineering and Technology, 2018. № 05(09), pp. 110.
8. Usps.gov «Blockchain Technology: Possibilities for the U.S. Postal Service», RARC Report, RARC-WP-16-011, 2016– URL: <https://www.usps.gov/sites/default/files/document-library-files/2016/RARC-WP-16-001.pdf>

REFERENCES

1. Cerasis. «What Is Blockchain Technology, and What Is Its Potential Impact on the Supply Chain?», 2016 – URL: <http://cerasis.com/2016/06/29/blockchain-technology/>
2. Connecting to Compete 2016: Trade Logistics in the Global Economy. The Logistics Performance Index and Its Indicators. URL: https://wb-lpi-media.s3.amazonaws.com/LPI_Report_2016.pdf
3. Gonchar O., Zamkova N., Polishchuk I., Dovhan Y. & Sokolovska V. Oil and fat business of Ukraine: marketing orientation for achieving competitive advantages. European Journal of Sustainable Development. 2020. Vol. 9. No 4. P. 261–272. DOI: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n4p261>
4. Haq, I., Monfared, R.P., Harrison, R., Lee, L., and West, A. A new vision for the automation systems engineering for automotive powertrain assembly // International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2010. №23, pp.308-324
5. J. Ream, Y. Chu, and D. Schatsky. Upgrading blockchains: Smart contract use cases in industry // Deloitte University Press, 2019. № 02 (04), pp. 111.
6. PwC.com «Shifting patterns: The future of logistics industry», official report, 2020 – URL: <http://www.pwc.com/gx/en/industries/transportation-logistics/publications/the-future-of-the-logistics-industry.html>
7. Saveen A. Abeyratne, Radmehr P. Monfared. Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger // International Journal Of Research in Engineering and Technology, 2018. № 05(09), pp. 110.
8. Usps.gov «Blockchain Technology: Possibilities for the U.S. Postal Service», RARC Report, RARC-WP-16-011, 2016– URL: <https://www.usps.gov/sites/default/files/document-library-files/2016/RARC-WP-16-001.pdf>

R. Melnyk, S. Tsybal. Innovative technologies: blockchain and artificial intelligence in logistics and road transport

The article examines the application of blockchain technology in the field of logistics and supply chain management, and we will also get acquainted with the main global trends in this field. Blockchain technology is an innovative technology that allows you to create reliable and transparent systems for recording, storing and transmitting information. In logistics and supply chain management, since the integration of key business processes requires reliable information support. Blockchain can provide such support, ensuring transparency and monitoring of current information.

The purpose of the article is to study and analyze the application of blockchain technology in the field of logistics and road transportation, since these innovative technologies are able to optimize and improve processes in supply chains, as well as in freight management, including increasing the efficiency of logistics operations.

The article also examines in detail examples of the application of blockchain technology in leading companies, including retail, and provides the main advantages. Thus, it is concluded that blockchain technologies have great potential for the digitalization of logistics and supply chain management, which ensure reliability, transparency and efficiency of interaction between various participants in the supply chain, as well as increase the trust of buyers in the process of purchasing and delivering goods.

Keywords: supply, blockchain technology, artificial intelligence, logistics, road transportation, information transfer, digitalization.

МЕЛЬНИК Руслана Володимирівна - аспірантка, аспірантка кафедри Автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: ruslaana69@gmail.com

ЦИМБАЛ Сергій Володимирович - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net

Ruslana MELNYK, graduate student, graduate student of the Automobile and Transport Management Department, Vinnytsia National Technical University, e-mail: ruslaana69@gmail.com

Serhii TSYMBAL - PhD in Engineering, associate professor, head of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net
DOI 10.36910/automash.v1i24.1734

Михайлик В.Г., Шаповал М.В.

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»***ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГІДРОПРИВОДНОГО ОДНОПОРШНЕВОГО РОЗЧИНОНАСОСА З КОМБІНОВАНИМ КОМПЕНСАТОРОМ ЗБІЛЬШЕНОГО ОБ'ЄМУ**

Аналіз сучасних насосів вказує на пошук шляхів щодо вдосконалення та спрощення їх конструкцій задля забезпечення високих рівнів технічних показників: механічного ККД, об'ємного ККД рівня подачі, а також низького рівня ступеня пульсацій тиску та подачі, знижених показників енерговитрат залежно від конструктивних параметрів їх надійності під час транспортування будівельних розчинів.

Тому визначено основні напрямки розвитку нових конструкцій розчинонасосів та запропоновано нову конструкцію однопоршневого розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму. Застосування у розчинонасосі гідравлічного привода є актуальним та має ряд переваг по відношенню до електромеханічного. Перевагами використання гідравлічного привода є: постійна швидкість робочого органа, що позитивно вплине на зниження зворотних втрат через всмоктувальний та нагнітальний клапани за рахунок стабілізації їх швидкості підйому та опускання, особливо під час перекачування розчинів зниженої рухомості П 7-9 см; постійна швидкість руху розчину в гідравлічній частині насосу під час подачі зменшить до мінімуму рівень пульсацій тиску розчину; можливість забезпечення плавності регулювання подачі розчину під час роботи розчинонасоса, що сприятиме якості оздоблювальних робіт; використання розчинонасоса в комплексі з гідроприводними штукатурними станціями чи комплектами. Вказані переваги суттєво підвищать техніко-економічні показники використання гідравлічного привода в розчинонасосах як окремо так і в складі штукатурних агрегатів.

У представлений роботі розглядаються теоретичні дослідження витрат енергоживлення однопоршневих розчинонасосів з електромеханічним та гідравлічним приводами. Проведено порівняльний аналіз витрат залежно від закону руху робочого органа, впливу компенсуючого пристрою на стабілізацію ступеня пульсацій тиску та типів приводів розчинонасосів, а також впливу гідродинамічного тиску на основі закону Бернуллі.

Встановлено механізми впливу гідродинамічного тиску в гідравлічній частині розчинонасоса, які напряму впливають на енергетичні витрати.

Ключові слова: однопоршневий розчинонасос з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму, гідравлічний привод, електромеханічний привод всмоктувальна камера, всмоктувальний та нагнітальний клапани, об'ємний ККД, ступінь пульсацій тиску, рухомість розчину.

ВСТУП

Розчинонасоси необхідні для перекачування гумовотканинними або металевими трубопроводами розчинів різного складу і призначення та для механізованого їх нанесення на оброблювані поверхні будівельних конструкцій за допомогою повітряної форсунки або безкомпресорного сопла.

До середовищ, які перекачують розчинонасосами відносять будівельні розчини, а саме: вапняно-піщані штукатурні, цементно-піщані, на основі крейди розчини різної рухомості, які використовують для оштукатурювання, стяжок наливних підлог, фарбування і т.д.

Перекачування будівельних розчинів в основному проводять насосами об'ємної дії. Принцип роботи таких насосів об'ємної дії полягає у періодичній зміні об'єму робочої камери, який збільшується під час усмоктування суміші й зменшується при її нагнітанні в трубопровід.

Перехід від ручного нанесення розчинів на механізоване, який відбувається останнім часом, підвищує продуктивність оздоблювальних робіт та дає змогу значно збільшити змінне напруження на одного штукатура. Нова технологія дає можливість застосовувати для нанесення розчинів на оброблювані поверхні різних за конструктивними особливостями форсунок і насадок, що встановлюються на кінці напірного рукава. Галузі застосування розчинонасосів усе розширюються. Вагомий ефект та якість дає використання розчинонасосів для подачі під час укладання цементно-піщаних розчинів при виконанні наливної стяжки підлог, нанесення на оздоблювальні поверхні, заповнення під тиском жорсткими розчинами стиків і швів між залізобетонними конструкціями, а також для подачі оздоблювальних розчинів при великому фронті робіт.

У теорію і практику економічно доцільнішого трубопровідного транспортування будівельних розчинів розчинонасосами вагомий вклад внесли вчені та інженери: С.І. Алексєєв, М.І. Альошин, С.С. Абель, Ю.М. Баженов, А.М. Баранов, Ю.І. Беляков, М.С. Болотських, С.О. Гузенко, В.М. Євстифєєв, І.А. Ємельянова, М.М. Завражин, А.О. Задорожний, Г.В. Івянський, М.С. Канюка, Б.О. Коробко, М.О. Меленцов, І.І. Назаренко, О.Г. Онищенко, С.П. Парфенов, А.М. Проценко, Є.С. Стайченко, В.Д. Топчій, В.У. Уст'янець, Ю.П. Чирков та ряд інших відомих дослідників. Створення та розроблення сучасних штукатурних агрегатів та розчинонасосів присвячені роботи ряду вітчизняних і закордонних дослідників.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розчинонасоси вважаються основними агрегатами під час проведення оздоблювальних робіт. Використання розчинонасосів для транспортування малорухомих будівельних розчинів до робочих місць і механізованого їх нанесення на поверхні стін висуває до їх конструкції ряд специфічних вимог.

Це здатність розчинонасоса здійснювати стабільну подачу по трубопроводах будівельних розчинів різної рухомості. Подача сучасними розчинонасосами розчинів рухомістю від П10 см взагалі не становить особливих ускладнень під час перекачування. Сучасні технології проведення оздоблювальних робіт [6, 7, 8] забезпечують використання розчинів рухомістю П 9...10 см, а рухомість кладочних цементно-піщаних розчинів, що подаються трубопроводами, відповідно – П 7...8 см. Стабільна подача таких розчинів можлива тільки при використанні розчинонасоса з високою всмоктувальною здатністю а, також відсутністю конструктивних умов для "зависання" нагнітального і всмоктувальних клапанів.

Важливо щоб розчинонасос забезпечував стабільну подачу будівельних розчинів. Широко поширені однопоршневі розчинонасоси односторонньої дії [5], які характеризуються підвищеною пульсацією подачі. Цей негативний фактор є серйозною перешкодою для виконання якісного соплування до отримання рівномірного штукатурного шару необхідної товщини, оскільки для нормальної роботи форсунки чи безкомпресорного сопла необхідна стабільна подача розчину. У іншому випадку струмінь розчину є нестабільним, цілеспрямоване нанесення розчину на оброблювану поверхню стає ускладненим, а втрати розчину за рахунок зростаючого відскоку суттєво збільшуються. Важливо також, що при стабільній подачі розчину опір його просуванню в трубопроводі у 1,5 рази зменшується, ніж коли пульсації тиску розчину, що позитивно позначається на енергоспоживанні розчинонасоса.

З цих причин сучасні розчинонасоси [2, 3, 4, 7] повинні мати високий рівень основних показників продуктивності та коефіцієнт корисної дії (ККД), оскільки втрати розчину через клапанні вузли та ущільнення призводять до нерівномірності подачі розчину на протязі робочого циклу розчинонасоса, а також спричиняють надмірні енергоспоживання у зв'язку із зниженням продуктивності.

Сучасні житлові та промислові будівлі потребують подачі будівельних розчинів трубопроводами від поверхні землі на висоту до 50 і більше метрів. Для подачі розчинів на таку висоту розчинонасос повинен розвивати тиск 4...6 МПа. Такий тиск на сучасному етапі розвитку можуть забезпечити тільки насоси об'ємної дії – поршневі та плунжерні.

Останнім часом для полегшення праці і підвищення ефективності роботи відбувається широке впровадження автоматичних модулів, які забезпечують плавність проведення штукатурних робіт.

Важливою особливістю розчинонасоса, зручного для механізації штукатурних робіт, є можливість оперативної зміни його продуктивності за сигналом штукатура [6, 8]. Зараз доцільна присутність плавного регулювання подачі, це облегшило виконання штукатурних робіт з однаковою швидкістю як на відкритих поверхнях, так і в обмежених умовах, а також у приміщеннях складного планування. Наявність у насосі пристрою для плавної зміни продуктивності (регулятора частоти обертання електродвигуна, регулятор гідропривода) дозволяє зменшити витрати потужності його привода, тому що при транспортуванні розчинів з зниженою рухомістю або при подачі їх на значну висоту 30-50 м, коли потрібно забезпечити високий тиск, можна використовувати знижену продуктивність насоса. Оперативне регулювання продуктивності насоса є однією з основних умов для впровадження комплексно механізованих та автоматизованих технологій операційного оштукатурювання поверхонь.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи підвищення ефективності роботи однопоршневого розчинонасоса за рахунок використання гідравлічного привода з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму при раціональних режимах технологічних процесів, що забезпечить: зниження ступеня пульсацій тиску подачі по трубопроводу, стабільну продуктивність і об'ємний ККД та відповідно **зниження енергетичних витрат**.

Ціль роботи провести теоретичний порівняльний аналіз **енергетичних витрат** розчинонасосів з різними типами приводів.

Для вирішення **поставлених задач** використовувались: методи математичної фізики, фізико-математичне моделювання методами прикладної механіки, основні положення гідродинаміки,

статистична обробка експериментальних даних, метод планувального експерименту, комп'ютерне програмування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У Національному університеті "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" створено однопоршневий розчинонасос з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму [4], що має електромеханічний привод, який зарекомендував себе як надійний і високоефективний насосний агрегат. Але перекачування розчинонасосом розчинів зниженої рухомості не в повній мірі задовольняє сучасним вимогам нижче рівня $\delta \geq 25\%$.

Але для підвищення технічних характеристик розчинонасоса необхідно впровадити у конструкцію розчинонасоса гідропривод, який забезпечить постійну швидкість поршня під час зворотно-поступального руху, як в такті всмоктування так і в такті нагнітання. Це позитивно вплине на всмоктувальну здатність розчинонасоса, особливо при перекачуванні розчинів зниженої рухомості П8...9 см, та зменшить зворотні витoki через всмоктувальний та нагнітальний клапани за рахунок швидшого підйому та опускання кульок біля "мертвих" точок, що позитивно вплине на зниження рівня пульсацій тиску $\delta \leq 25\%$.

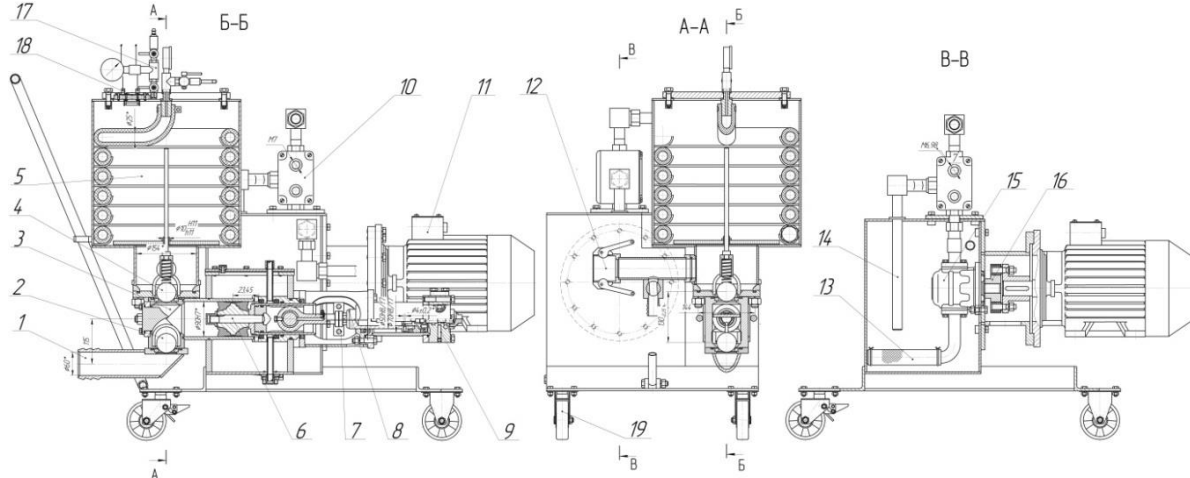


Рисунок 1 – Конструктивна схема однопоршневого гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму: 1, 12 – усмоктувальний та нагнітальний патрубок; 2, 4 – всмоктувальний та нагнітальний підпружинений кульові клапани; 3 – усмоктувальна камера; 5 – комбінований компенсатор; 6 – поршень з направляючим плунжером; 7 – хомут гідравлічний привідний циліндр з розподільвачем; 8 – гідроциліндр з поршнем і штоком; 9 – золотниковий розподільник; 10 – регулятор подачі гідравлічної рідини; 11 – електродвигун; 13 – фільтр мастильної рідини; 14 – патрубок скидання гідравлічної рідини; 15 – шестерневий гідравлічний насос; 16 – муфта втулково-пальцева; 17 – редуктор підкачки повітря; 18 – скляне віконце з освітленням

Тому пропонується конструкція гідроприводного розчинонасоса одинарної дії з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму (рис. 1).

На рис. 2. представлено схему гідравлічної системи приводу розчинонасоса

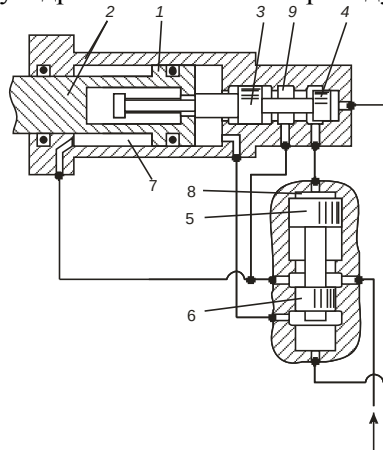


Рисунок 2 – Схема гідравлічної системи приводу розчинонасоса: 1 – поршень гідроциліндра; 2 – шток поршня; 3 – нижній поясок золотника керування; 4 – верхній поясок золотника керування; 5 – лівий поясок основного золотника; 6 – правий поясок основного золотника; 7 – штокова порожнина основного гідроциліндра; 7 –

Існує математична модель [2, 3] роботи гідроциліндра приводу поршня насосної колонки, яка дозволяє краще зрозуміти всмоктувальну спроможність розчинонасоса, характер спрацьовування кулькових клапанів на відкривання та закривання, механізм утворення зворотних витоків розчину під час закривання клапанів, ступінь ударних навантажень кульок клапанів під час їх спрацьовування на закриття та рівень шуму від цього явища й швидкість зношування гнізд клапанів, механізм утворення рівня об'ємного ККД гідроприводного розчинонасоса та ступеня пульсацій тиску подачі.

Схема гідравлічної системи автоматичного приводу розчинонасоса, що використовуються при описанні математичної моделі, наведена на рис. 2.

Система диференціальних рівнянь, що описують першу фазу – розгін поршня від нижньої мертвої точки:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{dv}{dt} = -(F_m + m \cdot g) + P(t) \cdot (S - S') \\ \beta \cdot \frac{dP}{dt} = -v(t) \cdot (S - S') + Q_0, \end{cases} \quad (1)$$

де m – маса елементів приводу, що рухаються; F_m – сила впливу на масло під час злиття із поршневої порожнини гідроциліндра; g – прискорення земного тяжіння; S і S' – відповідно площі циліндро-поршневої й перетину штокової порожнин гідроциліндра; β – коефіцієнт об'ємного стиснення масла; Q_0 – подача масла гідронасосом.

Повне визначення швидкості поршня буде у вигляді суми $v_{одн}(t)$ і v_r , а саме

$$v(t) = v_{одн}(t) + v_r = C_1 \cdot \cos\left(\frac{S - S'}{\sqrt{\beta \cdot m}} \cdot t\right) + C_2 \cdot \sin\left(\frac{S - S'}{\sqrt{\beta \cdot m}} \cdot t\right) + \frac{Q_0}{S - S'}. \quad (2)$$

Початкові умови для цього рішення такі:

$$\begin{cases} v(0) = 0 \\ v'(0) = \frac{P(0) \cdot (S - S')}{m} - \frac{F_m + m \cdot g}{m}. \end{cases}$$

Із рівняння (1) при $t = 0$ $C_1 = -\frac{Q_0}{S - S'}$, а після диференціювання рівняння (2) при $t = 0$

$$C_2 = \frac{v'(0) \cdot \sqrt{\beta \cdot m}}{S - S'}.$$

Підставивши значення коефіцієнтів C_1 і C_2 в рівняння (2), що описує швидкість розгону робочого органа (поршня) у першій фазі:

$$v(t) = -\frac{Q_0}{S - S'} \cdot \cos\left(\frac{S - S'}{\sqrt{\beta \cdot m}} \cdot t\right) + v'(0) \cdot \frac{\sqrt{\beta \cdot m}}{S - S'} \cdot \sin\left(\frac{S - S'}{\sqrt{\beta \cdot m}} \cdot t\right) + \frac{Q_0}{S - S'}. \quad (3)$$

Підставивши в рівняння (3) замість $v(t)$ величину $\frac{Q_0}{(S - S')}$, тобто кінцеву швидкість розгону поршня, і виконавши деякі перетворення, знайдемо час розгону поршня

$$t_p = \frac{\sqrt{\beta \cdot m}}{S - S'} \cdot \arctg\left(\frac{Q_0}{v'(0) \sqrt{\beta \cdot m}}\right). \quad (4)$$

Визначений за залежністю (4) час розгону поршня складає 0,00214 с, що значно менше, ніж час закриття нагнітального клапана (0,0225 с). Розгін поршня відбувається при повністю відкритому нагнітальному клапані, а отже, відрив поршня від розчину неможливий, оскільки в поршневій порожнині зберігається тиск, близький до номінального тиску нагнітання розчину.

Із рівняння системи **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** можна також визначити тиск

масла наприкінці розгону поршня $P(t) = \frac{F_0 + m \cdot g + m \cdot v'(t)}{S - S'}$, який дорівнює 4,22 МПа.

У другій фазі постійна швидкість руху поршня складатиме

$$v = \frac{Q_0}{S - S'} = \frac{6,93 \cdot 10^{-4}}{38,5 \cdot 10^{-4} - 19,6 \cdot 10^{-4}} = 0,367 \text{ м/с},$$

а тиск масла до закриття нагнітального клапана – 3 МПа і після його закриття – 8,3 МПа при тиску розчину 2,5 МПа.

У третій фазі швидкість руху поршня зросте в результаті витискування в лінію напору масла з диференціальної порожнини золотника керування й складе

$$v = \frac{Q_0}{S - S' - S_1 + S'_1} = \frac{6,93 \cdot 10^{-4}}{(38,5 - 19,6 - 3,8 + 2,1) \cdot 10^{-4}} = 0,403 \text{ м/с},$$

де S_1 і S'_1 – відповідно площі більшого та меншого поясків золотника керування.

Тиск масла зросте у тій самій пропорції й буде дорівнювати 9,12 МПа.

$$\text{Час цієї фази буде тривати } t_3 = \frac{y_1}{v} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,403} = 0,0149 \text{ с},$$

де y_1 – хід золотника керування до початку відкривання щілини.

У четвертій фазі масло перекачується маслососом та розділяється на два потоки – в штокову порожнину гідроциліндра і в порожнину 8. Залежність розподілення потоку масла має такий вигляд

$$v(t) \cdot (S - S' - S_1 + S'_1) + \mu \cdot S_{щ} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P} = Q_0, \quad (5)$$

де μ – коефіцієнт витрати масла; $S_{щ}$ – площа щілини відкривання золотника;

γ – густина масла; ΔP – перепад тиску масла перед щілиною.

Рішення залежності (5) за аналогією, прийнятою для першої фази, дає рівняння для швидкості гальмування

$$v = v'(t) = \frac{Q_0}{S - S' - S_1 + S'_1} \cdot e^{-\alpha \cdot \sqrt{P} \cdot t}. \quad (6)$$

$$\text{Час гальмування до } v \cdot 10^{-3} \text{ складе } t_{\text{зг}} = \frac{\ln 1000}{\alpha \cdot \sqrt{P}} = \frac{2,3 \cdot 3}{1,91 \cdot \sqrt{P}} = \frac{3,61}{\sqrt{P}}, \text{ та означає, що час до повного}$$

зупинення поршня обернено пропорційний кореню квадратному тиску масла. Коли тиск масла в гідросистемі в межах 5...10 МПа час гальмування складатиме від 0,0011 до 0,0016 с.

Після зупинки поршня все масло, яке нагнітається від маслососа, витрачає енергію на переміщення основного золотника. Розрахунки за залежностями вище показують, що час на кінцеве переміщення цього золотника складає 0,0069 с.

За аналогічною методикою визначені рівні швидкості руху поршня, тиск масла й час руху поршня для 5–8 фаз.

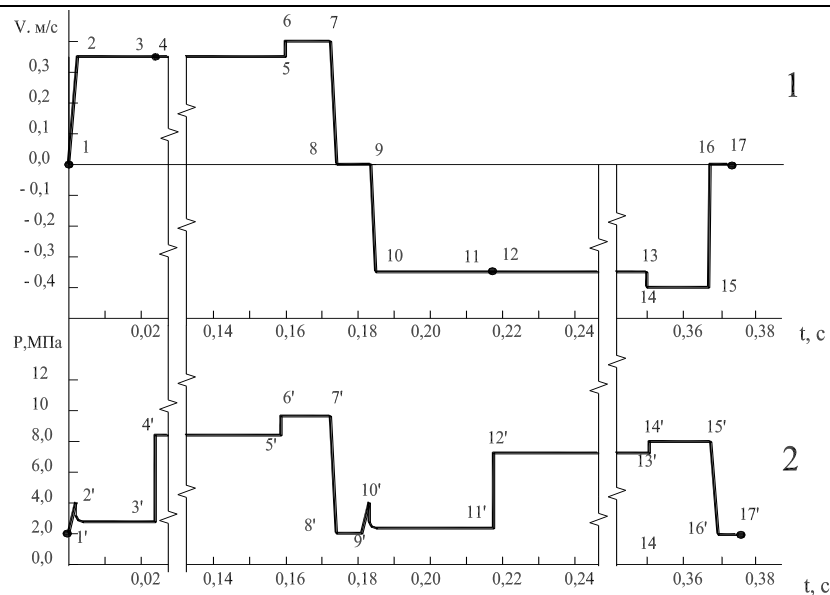


Рисунок 3 – Залежності зміни швидкості руху поршня (1) і тиску масла (2) протягом циклу роботи гідроциліндра

На основі математичного аналізу встановлено залежності зміни швидкості руху поршня (1) і тиску масла (2) протягом циклу роботи гідроциліндра.

За цикл роботи розчинонасоса відбувається швидкий перехід поршня від періоду гальмування та розгону в крайніх "мертвих" точках до робочої стабільної швидкості сприяє тому, що більшу частину ходу поршень рухається з постійною швидкістю, що у свою чергу, позитивно впливає на зниження рівня ступеня пульсацій тиску подачі перекачуваного розчину та рівномірність подачі розчину.

Таблиця 1 – Зведені дані по усіх фазах зміни швидкості руху поршня й тиску масла протягом циклу роботи гідроциліндра

Познач. ділянки	Назва ділянки	Тривалість, с	v, м/с		P, МПа	
			почат.	кінець	почат.	кінець
1 – 2	Фаза 1, розгін уверх	0,00214	0,000	0,367	2,00	4,22
2 – 3	Фаза 2, частина 1	0,0225	0,367	0,367	3,00	3,00
4 – 5	Фаза 2, частина 2	0,1347	0,367	0,367	8,30	8,30
6 – 7	Фаза 3	0,0149	0,403	0,403	9,12	9,12
7 – 8	Фаза 4, гальмування	0,0015	0,403	0,000	9,12	2,00
8 – 9	Переключення осн. золотника	0,0069	0,000	0,000	2,00	2,00
9 – 10	Фаза 5, розгін униз	0,00302	0,000	0,354	2,00	4,02
10 – 11	Фаза 6, частина 1	0,0307	0,354	0,354	2,29	2,29
12 – 13	Фаза 6, частина 2	0,1351	0,354	0,354	7,20	7,20
14 – 15	Фаза 7	0,0157	0,389	0,389	7,92	7,92
15 – 16	Фаза 8, гальмування	0,0020	0,389	0,000	7,92	2,00
16 – 17	Переключення осн. золотника	0,0038	0,000	0,000	2,00	2,00

Математичний аналіз роботи гідроприводу дозволив встановити, що досить тривалі зупинки поршня у "мертвих" точках обумовлені витратами масла на переключення основного золотника. В даному випадку сумарний час зупинок на переключення цього золотника складе $0,0069 + 0,0038 = 0,0107$ с в порівнянні з часом одного циклу роботи розчинонасоса

$\frac{60}{161} = 0,373$ с. А отже час зупинок поршня у мертвих точках складе 2,9%, у той же час як сумарна

тривалість усіх розгонів і гальмувань поршня за один цикл тільки 2,32%. Для скорочення часу переключення поршня при подальшому проектуванні необхідно зменшувати діаметри поясів основного золотника, а також величину ходу цього золотника, хоча це теж високі показники стабільності спрацювання золотників біля "мертвих" точок.

Визначення потужності гідроприводного однопоршневого розчинонасоса з комбінованим

компенсатором збільшеного об'єму

На початку аналізу робочого циклу варто зазначити, що процеси, які відбуваються в гідравлічній частині, традиційно характеризуються зміною тиску [74, 89]. Характер зміни тиску, що залежить від місцевих опорів як в гідравлічній частині розчинонасоса, так і трубопроводах, прямо пропорційно впливає на енерговитрати розчинонасосом, які визначаються відповідно залежності на основі рівняння Бернуллі

– при всмоктуванні

$$p_{вс}(t) = p_0 + \rho \cdot g \cdot (H_{вс} - S_n(t)) - \rho \cdot a_n(t) \cdot (L_{вс} + S_n(t)) - (1 + \zeta_{o.в}(t)) \cdot \rho \cdot \frac{v_n(t)^2}{2} - \Delta p_{вс.кл}(t), \quad (7)$$

– при нагнітання

$$p_{нз}(t) = p_0 + \rho \cdot g \cdot (H_{нз} - S_n(t)) + \rho \cdot \frac{v_n(t)^2}{2} \cdot \left(\frac{D_n}{d_{нз}} \right) + \rho \cdot a_n(t) \cdot (L_{нз} + S_n(t)) + (\zeta_{o.н}(t) - 1) \cdot \rho \cdot \frac{v_n(t)^2}{2} + \Delta p_{н.кл}(t) - \Delta p_{комп}(t), \quad (8)$$

де p_0 – атмосферний тиск, Па; ρ – щільність розчину, кг/м³; $H_{вс}$ – висота рівня розчину над рівнем поршня на початку всмоктування, м; $H_{нз}$ – висота, на яку подається розчин по трубопроводу, м; $S_n(t)$, $v_n(t)$, $a_n(t)$ – переміщення, швидкість та прискорення поршня залежно від часу, у відліку від ПМТ; $\zeta_{o.в}(t)$, $\zeta_{o.н}(t)$ – приведені коефіцієнти опору всмоктувального і нагнітального трубопроводів, визначаються характеристиками розчину, геометрією трубопроводу й фазою роботи насоса; $\Delta p_{вс.кл}(t)$, $\Delta p_{н.кл}(t)$, $\Delta p_{комп}(t)$ – опір всмоктувального, нагнітального клапанів та об'єму повітря у компенсаторі, залежно від фази роботи насоса, Па; D_n – діаметр поршня, м; $d_{нз}$ – діаметр нагнітального трубопроводу, м; $L_{вс}$, $L_{нз}$ – приведена довжина всмоктувального й нагнітального трубопроводів, м.

Відомо, що для визначення потужності розчинонасоса існує залежність [84]

$$N_{\partial в} = \frac{p(t_3) \cdot Q_m}{3,6 \cdot \eta_{рн}}, \quad (9)$$

де $\eta_{рн}$ – загальний ККД розчинонасоса; $p(t)$ – тиск подачі за цикл роботи розчинонасоса, кПа; Q_m – теоретична подача розчинонасосом, м³/год.

Витрату потужності можна розділити на витрату під час всмоктування $N_{вс}(t)$ та під час нагнітання

$$N_{нз}(t) \quad N_{рн}(\varphi) = N_{вс}(\varphi) + N_{нз}(\varphi). \quad (10)$$

Загальний ККД розчинонасоса

$$\eta_{рн} = \eta_{ел} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{об} \cdot \eta_{гидр} \quad (11)$$

де $\eta_{ел}$, $\eta_{мех}$, $\eta_{об}$, $\eta_{гидр}$ – відповідно електродвигуна, механічний, об'ємний, гідравлічний

ККД.

Для кінематичної схеми рис. 2

$$\eta_{мех} = \frac{\eta_{кл.л} \cdot \eta_{з.л} \cdot \eta_{підш}}{dz_1 / \eta_{з1} \cdot \eta_{ш}^{n_o}}, \quad (12)$$

де $\eta_{кл.л}$ – к.к.д. клинопасової передачі; $\eta_{з.л}$ – к.к.д. зубчастої передачі; $\eta_{підш}$ – к.к.д. підшипникових вузлів; $\eta_{з1}$ – витрати потужності на здолаття тертя в циліндрі, dz_1 – рівень використання потужності поршнем; $\eta_{ш}$ – к.к.д. шарнірів; n_o – кількість шарнірів.

Гідравлічні втрати потужності в розчинонасосі визначається за формулою

$$\eta_{\Gamma} = \frac{N_{1\text{зідр}}}{N_{1\text{зідр}} + N_{2\text{зідр}}}, \quad (13)$$

де $N_{1\text{зідр}}$ – гідравлічні втрати в розчинонасосі, що виникають за рахунок внутрішнього тертя в розчині; $N_{2\text{зідр}}$ – лінійні і місцеві витрати безпосередньо в розчинонасосі.

Остаточно залежність з визначення втрат потужності, кВт розчинонасосом в процесі роботи матиме вигляд

$$0 \leq t_{\text{зм}} \leq t_{\text{нз}}, \quad N_{\text{нз}}(\varphi) = \frac{P_{\text{атм}} \cdot V_{\text{комп}} \cdot Q_m}{\left(3,6 \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\Gamma} \cdot [V_{\text{повн}} \cdot (1 \pm \varepsilon)] \cdot (1 - \varepsilon_{\text{см2}}) - \Delta V_{\text{н.кл}} \cdot (1 + \varepsilon_{\text{см2}}) - V_{\text{шк}}\right)} \cdot \frac{V_p \cdot (1 - \varepsilon_{\text{см2}})}{\left(V_0 - F_n \cdot \left\{\frac{Q_0}{S' - S_1 + S_1'} - \frac{h_n}{2\pi} \cdot t\right\} \cdot (1 - \delta)\right)} \quad (14)$$

$$t_{\text{нз}} \leq t_{\text{зм}} \leq t_{\text{вс}}, \quad N_{\text{вс}}(\varphi) = \frac{P_{\text{атм}} \cdot V_{\text{комп}} \cdot Q_m}{\left(3,6 \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\Gamma} \cdot [V_{\text{повн}} \cdot (1 \pm \varepsilon) - \Delta V_{\text{вс.кл}}] \cdot (1 - \varepsilon_{\text{см2}}) - V_{\text{шк}}\right)} \cdot \frac{V_p \cdot (1 - \varepsilon_{\text{см2}})}{\left(V_0 - F_n \cdot \left[\left(x_{\pi} - \frac{h_n}{2}\right) - \frac{h_n}{2\pi} \cdot (t_{\text{вс}} - t)\right] \cdot \varepsilon\right) \cdot (1 - \delta)}$$

Визначення витрат потужності, необхідних для роботи розчинонасоса з комбінованими компенсаторами різних конструктивних рішень.

Експериментальні дослідження зі споживання потужності на протязі циклу роботи розчинонасоса з комбінованим компенсаторами збільшеного об'єму та гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсаторами збільшеного об'єму проводилися з використанням спеціального вимірювального електрообладнання при перекачуванні розчинів різної рухомості. Витрати потужності розчинонасоса визначаються залежністю (14) і порівнюються з результатами експериментальних досліджень (рис. 4).

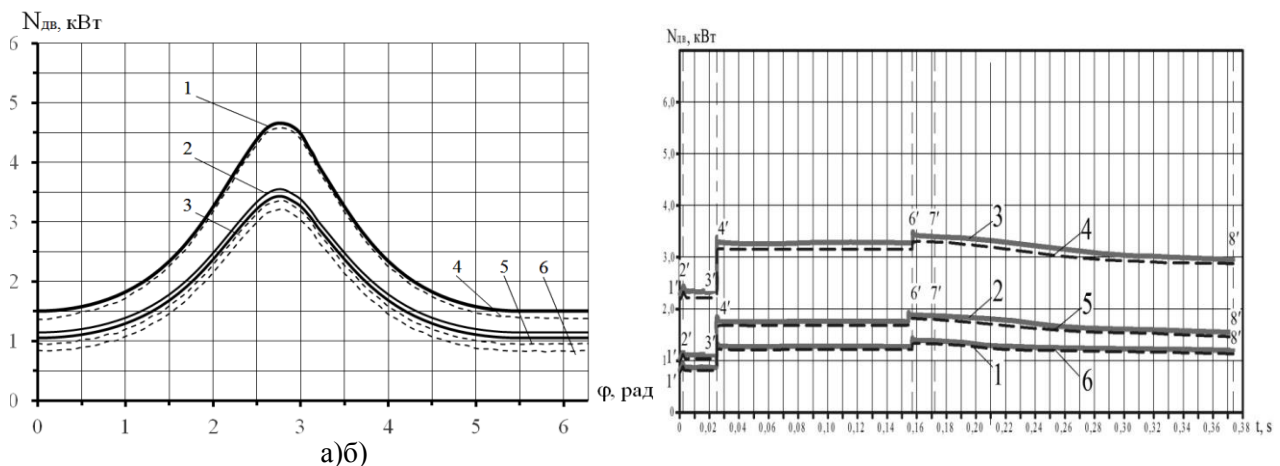


Рисунок 4 – Графічні теоретичні та експериментальні залежності потужності, що споживається на протязі циклу роботи розчинонасоса при різних рухомостях будівельного розчину:

- а – розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму;
- б – гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму
 - теоретичні 1 – при П8; 2 – при П10; 3 – при П12;
 - експериментальні 4 – при П8; 5 – при П10; 6 – при П12

Аналіз графічних результатів свідчить про те, що витрата потужності на протязі циклу роботи розчинонасосів прямо пропорційна тиску розчину і зворотно пропорційна ККД. За порівнянням як експериментальних, так і теоретичних залежностей (рис. 4) суттєвий вплив на витрату потужності до

максимальних значень здійснюють пульсації тиску розчину. Зменшення витрат потужності спостерігається у гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму (рис. 4) і сягає біля 21%. Це пояснюється зниженням пульсацій тиску розчину за рахунок руху поршня розчинонасоса з постійною швидкістю в такті нагнітання та ефективного спрацювання комбінованого компенсатора збільшеного об'єму.

Аналогічним чином для дослідження впливу раніше вказаних факторів на витрати потужності розчинонасоса з різними приводами знайдено рівняння регресії відповідно якому побудовані графічні залежності (рис. 5).

Для розчинонасоса з електромеханічним приводом одержано рівняння регресії в кодовому вигляді, згідно з яким побудовано графічні залежності (рис. 5, а, б, в, г)

$$Y_3 = 3,321 + 0,102 \cdot X_1 - 0,021 \cdot X_3 + 0,023 \cdot X_4 - 0,026 \cdot X_2^2 + 0,311 \cdot X_3^2 + 0,338 \cdot X_4^2 + 0,046 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,054 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,07 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (15)$$

Після заміни значень факторів в кодовому вигляді на дійсні рівняння регресії відображає зв'язок між потужністю $P_{\text{де}}$ розчинонасоса та вихідними факторами, вплив яких досліджується

$$Y_3 = 3,321 + 0,102 \cdot \left(\frac{P-10}{2} \right) - 0,021 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right) + 0,023 \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right) - 0,026 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right)^2 + 0,311 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right)^2 + 0,338 \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right)^2 + 0,046 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right) \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right) + 0,054 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right) \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right) + 0,07 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right) \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right) \quad (16)$$

Для гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму одержано рівняння регресії в кодовому вигляді, відповідно якому побудовані графічні залежності, а на (рис. 5, д, е, є, ж) приведені графічні залежності від факторів, що досліджуються

$$Y_4 = 3,572 + 0,091 \cdot X_1 + 0,188 X_1^2 + 0,327 X_2^2 + 0,322 \cdot X_3^2 + 0,261 \cdot X_4^2 + 0,013 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,038 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,039 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,054 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (17)$$

Натуральними значеннями факторів рівняння **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** має вигляд

$$Y_4 = 3,572 + 0,091 \cdot \left(\frac{P-10}{2} \right) + 0,188 \cdot \left(\frac{P-10}{2} \right)^2 + 0,327 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right)^2 + 0,322 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right)^2 + 0,261 \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right)^2 + 0,013 \cdot \left(\frac{P-10}{2} \right) \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right) + 0,038 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right) \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right) + 0,039 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right) \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right) + 0,054 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right) \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right) \quad (18)$$

Результати експериментальних досліджень (рис. 5, а, д) показують, що зменшення витрат потужності спостерігається при зростанні рухомості розчину, за рахунок зменшення опору просування по трубопроводу та зменшенню зворотних витоків через клапана. Графічні залежності експериментальних досліджень (рис. 5, б, е) показують, що витрати потужності прямо пропорційні зростанню тиску розчину, особливо спостерігається зростання витрати потужності при підвищенні тиску в діапазоні 1,5 – 2,5 МПа. Збільшення приведенного об'єму повітря компенсатора (рис. 5, в, є), який впливає на зменшення ступеня пульсацій тиску розчину в свою чергу зменшує витрати потужності. Результати експериментальних досліджень (рис. 5, г, ж) вказують на те, що зведення до мінімуму витрат потужності відбувається при куту нахилу спеціальної вставки у всмоктувальній камері 45° яка зменшує зворотні витоки через всмоктувальний клапан, і ти самим зменшує ступінь пульсацій тиску.

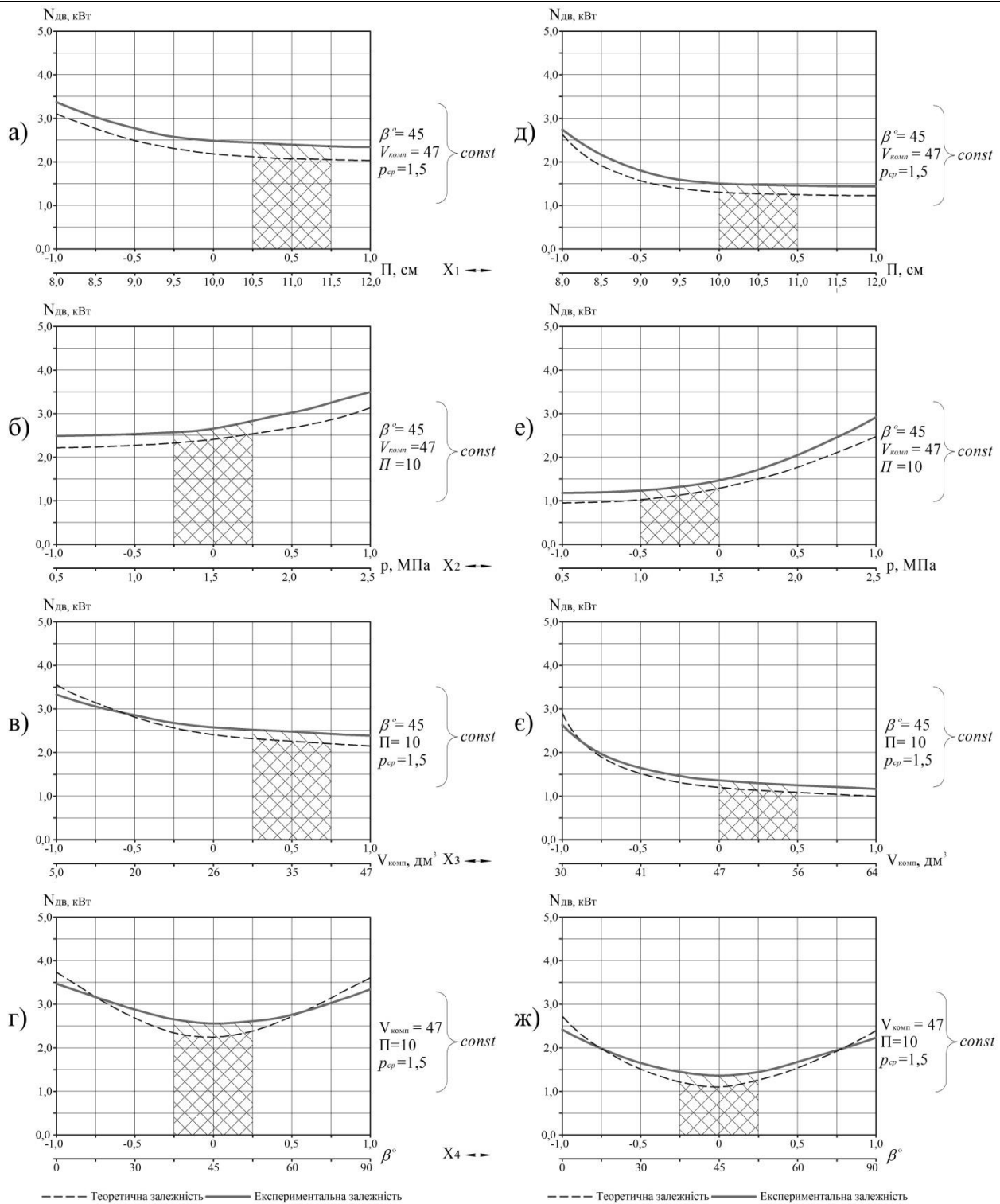


Рисунок 5 – Графічні залежності потужності: а), б), в), г) з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму; д), е), є), ж) гідроприводний з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму; а), д) від рухомості X_1 розчину; б), е) від та середнього тиску розчину X_2 ; в), є) від приведенного об'єму компенсатора; г), ж) від кута нахилу спеціальної вставки X_3 , що розташована у всмоктувальній камері

Зменшення витрат потужності на близько 1,2 кВт у гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму пов'язано з меншим рівнем ступеня пульсацій тиску подачі.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Представлена робота є закінченою науково-дослідницькою роботою, в якій на підставі порівняльного аналізу визначено теоретичні та експериментальні значення енергетичних витрат розчинонасосів залежно від експлуатаційних факторів з різними типами приводів та комбінованим

компенсатором збільшеного об'єму.

1. Встановлено залежності визначення потужності розчинонасоса на протязі циклу його роботи з врахуванням всіх факторів, що впливають на загальний ККД.

2. Аналіз експериментальних та розрахункових результатів досліджень (рис. 5) свідчить про те, що показник потужності для усіх випадків у гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму менший в порівнянні з розчинонасосом, який оснащено електромеханічним приводом комбінованим з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму. Діапазони раціональних технологічних параметрів (рис. 5) наступні $X_1 = 10 \dots 11$ см; $X_2 = 1,0 \dots 1,5$ МПа; $X_3 = 47 \dots 56$ дм³; $X_4 = 37,5 \dots 52,5^\circ$.

ВИСНОВКИ

Таким чином, можна констатувати, що гідроприводний розчинонасос удосконаленої конструкції з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму при аналогічних умовах роботи розчинонасосів має ряд переваг перед розчинонасосом, який оснащено електромеханічним приводом комбінованим з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму: зменшився ступінь пульсації тиску розчину на 15%; збільшилася продуктивність на 23%; знизилася витрати потужності на 21%.

Розбіжність результатів проведених експериментальних і теоретичних досліджень визначення потужності складає 10 – 15%.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Онищенко О.Г. Механізація опоряджувальних робіт у будівництві / О.Г. Онищенко, Б.Ф. Драченко, О.В. Головкін. – К.: Урожай, 1998. – 320 с.
2. Пат. 38155 Україна, МПК 7 F04B 9/02 Малоімпульсний насос / О. Г.Онищенко, А.В. Васильєв, В. У. Уст'янцев, М. В. Шаповал, Є.І. Василенко (Україна); заявник і патентовласник Полт. нац. техн. ун-т. ім. Ю. Кондратюка, № и 2000063184; заявл. 02.06.2000; опубл. 15.05.2001, Бюл. №.4.
3. Пат. 52851 Україна, МПК 6 F04B 9/08 Малоімпульсний насос / О.Г. Онищенко, В. У. Уст'янцев, М. В. Шаповал (Україна); заявник і патентовласник Полт. нац. техн. ун-т. ім. Ю. Кондратюка, № и 99020552; заявл. 02.02.1999; опубл. 15.01.2003, Бюл. №.1.
4. Пат. 112734 Україна, МПК F04B 11/00 Малоімпульсний насос / І.А. Ємельянова, Б. О. Коробко, М. В. Шаповал (Україна); заявник і патентовласник Полт. нац. техн. ун-т. ім. Ю. Кондратюка, № а 2015 11219; заявл. 16.11.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. №.19.
5. Шаповал М. В. Теоретичний аналіз роботи однопоршневого розчинонасоса з гідравлічним приводом / М. В. Шаповал, В. В. Вірченко, М. О. Скорик, А. І. Криворот // Науковий вісник будівництва. - 2019. - Т. 97, № 3. - С. 134-140. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2019_97_3_26
6. Коробко Б.О. Основи створення енергоефективних технологічних комплектів обладнання для штукатурних робіт : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.05.02 – машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій / Б.О. Коробко. – Харків, 2016. – 40 с.
7. Коробко Б. О. Створення та дослідження розчинонасосів нового покоління [Текст] : монографія / Б. О. Коробко. – Полтава : поліграфцентр Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, 2016. – 252 с.
8. Будівельна техніка: підручник О.Г. Онищенко, В.О. Онищенко, Б.О. Коробко, В.В. Вірченко / За ред. В.О. Онищенка. – К. : Кондор-Видавництво, 2017. – 416 с. ISBN 978-617-7458-19-6

REFERENCES

1. Onyshchenko O.G. Mechanization of finishing works in construction / O.G. Onyshchenko, B.F. Drachenko, O.V. Golovkin. – K.: Urozhay, 1998. – 320 p.
2. Pat. 38155 Ukraine, MPK 7 F04B 9/02 Low-pulse pump / O. G. Onyshchenko, A.V. Vasyliiev, V.U. Ustyantsev, M.V. Shapoval, E.I. Vasylenko (Ukraine); applicant and patent owner Polt. nat. tekhn. un-t. named after Yu. Kondratyuk, No. i 2000063184; appl. 02.06.2000; publ. 15.05.2001, Bull. No. 4.
3. Pat. 52851 Ukraine, MPK 6 F04B 9/08 Low-pulse pump / O.G. Onyshchenko, V.U. Ustyantsev, M.V. Shapoval (Ukraine); applicant and patent owner Polt. nat. tech. univ. named after Yu. Kondratyuk, No. i 99020552; appl. 02.02.1999; publ. 15.01.2003, Bull. No. 1.
4. Pat. 112734 Ukraine, MPK F04B 11/00 Low-pulse pump / I.A. Yemelyanova, B.O. Korobko, M.V. Shapoval (Ukraine); applicant and patent owner Polt. nat. tech. univ. named after Yu. Kondratyuk, No. a 2015 11219; appl. 16.11.2015; publ. 10.10.2016, Bull. No. 19.

5. Shapoval M. V. Theoretical analysis of the operation of a single-piston mortar pump with a hydraulic drive / M. V. Shapoval, V. V. Virchenko, M. O. Skoryk, A. I. Kryvorot // Scientific Bulletin of Construction. - 2019. - Vol. 97, No. 3. - P. 134-140. - Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2019_97_3_26
6. Korobko B. O. Fundamentals of creating energy-efficient technological sets of equipment for plastering work: author's abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: speciality 05.05.02 - machines for the production of building materials and structures / B. O. Korobko. – Kharkiv, 2016. – 40 p.
7. Korobko B. O. Creation and research of new generation mortar pumps [Text]: monograph / B. O. Korobko. – Poltava: Polygraphic Center of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University, 2016. – 252 p.
8. Construction machinery: textbook O.G. Onyshchenko, V.O. Onyshchenko, B.O. Korobko, V.V. Virchenko / Ed. V.O. Onyshchenko. – K.: Condor-Publishing, 2017. – 416 p. ISBN 978-617-7458-19-6

Mykhaylik V.G., Shapoval M.V. Determination of the power of a hydraulic-driven single-piston mortar pump with a combined compensator of increased volume

The analysis of modern pumps indicates the search for ways to improve and simplify their designs in order to ensure high levels of technical indicators: mechanical efficiency, volumetric efficiency of the supply level, as well as a low level of pressure and supply pulsations, reduced energy consumption indicators depending on the design parameters of their reliability during the transportation of building solutions.

Therefore, the main directions of development of new designs of mortar pumps have been determined and a new design of a single-piston mortar pump with a combined compensator of increased volume has been proposed. The use of a hydraulic drive in a mortar pump is relevant and has a number of advantages over an electromechanical one. The advantages of using a hydraulic drive are: a constant speed of the working body, which will positively affect the reduction of return losses through the suction and discharge valves by stabilizing their speed of lifting and lowering, especially when pumping mortars of reduced mobility $P \approx 7-9$ cm; a constant speed of movement of the mortar in the hydraulic part of the pump during feeding will minimize the level of pulsations of the mortar pressure; it is possible to ensure smooth regulation of the mortar supply during the operation of the mortar pump, which will contribute to the quality of finishing works; the use of the mortar pump in combination with hydraulically driven plastering stations or kits. These advantages will significantly increase the technical and economic indicators of using a hydraulic drive in mortar pumps both separately and as part of plastering units.

The presented work considers theoretical studies of energy consumption of single-piston mortar pumps with electromechanical and hydraulic drives. A comparative analysis of costs depending on the law of motion of the working body, the influence of the compensating device on the stabilization of the degree of pressure pulsations and types of mortar pump drives, as well as the influence of hydrodynamic pressure based on the Bernoulli law, is carried out.

The mechanisms of influence of hydrodynamic pressure in the hydraulic part of the mortar pump, which directly affect energy consumption, are established.

Key words: single-piston mortar pump with a combined compensator of increased volume, hydraulic drive, electromechanical drive, suction chamber, suction and discharge valves, volumetric efficiency, degree of pressure pulsations, mortar mobility.

МИХАЙЛИК Вадим Григорович, аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" e-mail: v.mikhajlik1988@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-2435-8592>

ШАПОВАЛ Микола Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" e-mail: nvshapoval75@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-6943-7687>

Vadym MYKHAYLIK, Postgraduate student of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, National University "Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk" e-mail: nvshapoval75@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-6943-7687>

Mykola SHAPOVAL, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, National University "Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk" e-mail: nvshapoval75@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-6943-7687>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1735

Мокряк Б.Ю.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПНЕВМАТИЧНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Стиснене повітря вже активно застосовується в енергетичних установках різного типу: для наддуву в двигунах внутрішнього згоряння, у комбінованих енергетичних системах при часткових режимах роботи двигуна, у комплексних установках зі змінним циклом роботи, що комбінує ДВЗ і пневматичний двигун, де використовується лише стиснене повітря. При цьому вихлопне повітря з залишковим тиском може бути повторно застосоване в інших циліндрах або збережене в балонах для подальшого використання. Повітря можна зберігати під дуже високим тиском без втрат навіть через тривалий час. Стиснене повітря є найбільш стійким джерелом енергії. Воно не залежить від змін температури чи погодних умов. Після стиснення повітря може бути використане в будь-який момент без втрати тиску.

Визначено недоліки пневматичних автомобілів. Зокрема, навіть за умов високого тиску стиснене повітря містить значно менше енергії порівняно з іншими джерелами енергії для транспорту, такими як рідке чи газоподібне паливо та акумулятори. Низька енергетична щільність стисненого повітря є значною перешкодою, яка може спричинити низьку динамічну продуктивність двигуна чи транспортного засобу. Для забезпечення безперервного постачання стисненого повітря під час роботи необхідно обмежувати потужність двигуна чи швидкість транспортного засобу. Крім того, балони для зберігання повітря повинні мати значний об'єм, щоб вмішувати достатню кількість стисненого повітря, що ускладнює просторову організацію транспортного засобу.

Запроновано пневмотрансмісію, яка складається з пневматичної виконавчої частини та електронної частини забезпечення і керування. Електронна частина забезпечення і керування (електробатарея і контролер) задіяна для живлення компресора і керування клапаном подачі стисненого повітря. Пневматична виконавча частина забезпечує формування робочого тіла (стисненого повітря) і його подачу до виконавчого шибєрного мотора.

Ключові слова: пневматичні автомобілі, стиснене повітря, пневматична трансмісія, шибєрний мотор, пластинчастий мотор.

ВСТУП

Використання сучасних енергетичних установок у транспорті з двигунами внутрішнього згоряння не здатне повністю вирішити екологічні питання, зумовлені трафіком, особливо у густонаселених міських районах із населенням понад мільйон осіб. Одним із перспективних напрямків покращення екологічної безпеки транспорту є застосування двигунів, які використовують стиснене повітря як робоче середовище. Це зумовлено низкою переваг пневматичних двигунів у порівнянні з іншими енергетичними системами: високий рівень безпеки, простота транспортування, екологічність, низька собівартість виробництва пневматичних транспортних засобів і стисненого повітря, а також легкість утилізації повітряних батарей і енергетичних систем.

Стиснене повітря вже активно застосовується в енергетичних установках різного типу: для наддуву в двигунах внутрішнього згоряння, у комбінованих енергетичних системах при часткових режимах роботи двигуна, у комплексних установках зі змінним циклом роботи, що комбінує ДВЗ і пневматичний двигун, де використовується лише стиснене повітря. При цьому вихлопне повітря з залишковим тиском може бути повторно застосоване в інших циліндрах або збережене в балонах для подальшого використання. Сьогодні такі компанії, як MDI, TATA тощо, вже створили пневматичні автомобілі, які підготовлені до серійного виробництва або вже випускаються, наприклад, на Гаваях. Харківський національний автомобільно-дорожній університет також займається дослідженням і розробкою пневматичних двигунів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У системі пневматичного приводу енергія зазвичай перетворюється двигуном у механічну потужність шляхом розширення стисненого повітря в циліндрі [1].

Поршневий механізм схожий на конструкцію стандартного двигуна внутрішнього згоряння, за винятком того, що в двигуні на стисненому повітрі відсутні форсунки або свічки запалювання. Робочий цикл такого двигуна складається з двох тактів: розширення та випуску. Важливо зазначити, що впускний процес відбувається на початку такту розширення. Впускний клапан відкривається зазвичай тоді, коли поршень досягає Верхньої Мертвої Точки, після чого стиснене повітря надходить у циліндр із повітряного балона. Коли впускний клапан закривається, стиснене повітря, що залишилося в циліндрі, розширюється далі, доки поршень не дійде до Нижньої Мертвої Точки.

Випускний клапан відкривається після завершення фази розширення, і стиснене повітря виходить із циліндра під час зворотного руху поршня.

Наприкінці 1970-х років австралійський винахідник Анджело Ді П'єтро розробив принципово новий двигун, який не має циліндрів і поршнів [2]. У його конструкції в корпусі обертається кільце, що спирається на спеціальні ролики, закріплені на валу. Розподіл повітря між камерами, утвореними лопатями, забезпечує спеціальна система. Змінюючи об'єм камер, ця система приводить у рух ротор, який передає силу безпосередньо на колеса. Двигун Анджело Ді П'єтро вирізняється своєю легкістю, простотою конструкції та відсутністю необхідності в коробці передач, оскільки здатний забезпечувати максимальний обертовий момент на низьких обертах.

Цей двигун має ряд переваг. Завдяки компактності й простоті конструкції пневмомотори можна встановлювати безпосередньо на колеса. До того ж здатність видавати максимальний крутний момент на дуже низьких обертах усуває потребу в коробці передач.

До 1991 року інженер-випробувач Гай Негре був одним із провідних конструкторів двигунів для Формули-1. Він заснував компанію Motor Development International (MDI) [2]. Перший розроблений Гаєм Негре двигун мав можливість працювати не лише на стисненому повітрі, а й на природному газі, бензині та дизельному паливі. Цю силову установку випробували на хетчбеку Citroen AX. На швидкостях до 60 км/год автомобіль рухався за рахунок енергії стисненого повітря, а при збільшенні швидкості установка автоматично переходила на бензин.

На перетворення пускового режиму пневматичного приводу в робочий знадобилося понад 10 років. Заснована групою однодумців компанія отримала назву Motor Development International. Її початковий проєкт не можна було назвати повноцінним пневмомобілем. Перший двигун Гає Негре працював не лише на стисненому повітрі, а й на природному газі, бензині чи дизельному паливі. У двигуні MDI всі ключові процеси – стиснення, займання горючої суміші та робочий цикл – відбувалися у двох циліндрах різного об'єму, з'єднаних сферичною камерою.

Силова установка була випробувана на хетчбеку Citroen AX. На швидкостях до 60 км/год, коли споживана потужність не перевищувала 7 кВт, автомобіль рухався виключно за рахунок енергії стисненого повітря. При перевищенні цієї швидкості двигун автоматично переходив на бензин, що дозволяло досягати потужності до 70 кінських сил. Витрата рідкого палива на шосе становила всього 3 літри на 100 км, що робило установку конкурентною навіть із сучасними гібридними автомобілями.

Команда MDI продовжила вдосконалювати двигун, працюючи над створенням повністю пневматичного автомобіля без використання рідкого чи газового палива. Першим прототипом став Taxi Zero Pollution, але він не привернув уваги розвинених країн, які сильно залежали від нафтової промисловості. Проте ідея зацікавила Мексику, де в 1997 році був підписаний договір про заміну таксопарку Мехіко, одного з найбільш забруднених міст світу, на транспорт, що працює на стисненому повітрі.

Наступною розробкою став Airpod, оснащений напівкруглим склопластиковим кузовом і 80-кілограмовими балонами для зберігання стисненого повітря, яких вистачало на 150–200 кілометрів шляху. Пізніше компанія представила проєкт OneCat — сучасніший аналог мексиканського таксі Zero Pollution. У карбонових балонах OneCat можна зберігати до 300 літрів стисненого повітря під тиском 300 бар.

Двигун MDI працює за таким принципом: у малий циліндр засмоктується повітря, яке стискається поршнем до тиску 18–20 бар і нагрівається. Потім підігріте повітря потрапляє у сферичну камеру, де змішується з холодним повітрям із балонів. Це холодне повітря миттєво розширюється, нагріваючись, і збільшує тиск на поршень великого циліндра, що передає зусилля на колінчастий вал.

Пневмомобілі можуть ефективно використовуватися в муніципальному та промисловому транспорті, а також як частина гібридних систем. Розробка таких двигунів сприяла появі нового типу транспорту – PHEV (pneumatic-hybrid electric vehicle), у якому пневматичний двигун комбінується з електродвигуном.

Сьогодні MDI повертається до своїх початкових ідей, розробляючи універсальний двигун, здатний працювати не лише на стисненому повітрі, але й на рідкому або газоподібному паливі.

Упродовж останнього десятиліття більшість досліджень двигунів на стисненому повітрі були зосереджені на поршневій конструкції. Лю та інші [3,4] створили математичні моделі таких двигунів і проаналізували їхню роботу в умовах одноетапного та двоетапного розширення. Результати підтвердили, що поршнева конструкція є оптимальним рішенням для двигунів на стисненому повітрі. Ю та інші [5] дослідили теоретичний цикл таких двигунів і виявили, що вихідна потужність двигуна має лінійну залежність від початкової температури розширення. Збільшити продуктивність можна за

допомогою багатоступеневої, квазіізотермічної експансії стисненого повітря. Лю та інші [6] запропонували оптимізаційний підхід до теоретичного циклу двигуна, використовуючи метод багатокритеріальної оптимізації. Максимальна ефективність досягалася при співвідношенні тиску впуску та коефіцієнта стиснення 32 та 13 відповідно. Для траєкторії поршня був розроблений механізм з подвійним колінчатим валом [6], який забезпечує зупинку поршня, доки тиск у циліндрі не зрівняється з впускним, а також дозволяє лінійну залежність швидкості поршня від площі впускного клапана.

Ху та інші [7] провели аналіз потоків у циліндрі двигуна, що дозволило виявити, що турбулентність біля впускного порту значно знижує енергоефективність через втрати стисненого повітря. Група з Пекінського університету авіації й астронавтики виконала віртуальне моделювання роботи двигуна [8,9], створивши модель, перевірену за допомогою пневматичного двигуна (APE) [9]. Команда розробила нову систему клапанів для дослідження динамічних характеристик і створила оптимальні стратегії керування клапанами, що розширило теоретичні знання про технологію пневматичних двигунів. Дослідження також охоплювало моделювання теплових процесів [10], яке показало значне зниження температури під час роботи. Для уникнення ризику замерзання через ефект дроселювання запропонували технологію компенсації температури [11], де етанол використовувався як теплообмінне середовище. Це дозволило підвищити ефективність двигуна на 30%. Ю та інші [12] запропонували механізм подвійного колінчатого з'єднання, що забезпечило стабільність тиску в циліндрі та підвищення енергоефективності в 1,86–2,86 рази.

Окрім поршневих двигунів, дослідження охоплювали й інші конструкції двигунів на стисненому повітрі.

Однак поршневий експандер має низку недоліків, таких як низька загальна ефективність, складна конструкція, швидке зношування та високий рівень шуму. У зв'язку з цим Хе та ін. [13] запропонували та спроектували одношнековий експандер для усунення цих проблем. Робочий цикл одношнекового експандера включає три основні етапи: впуск повітря, розширення повітря та його викид. На початку процесу стиснене повітря закачується під певним тиском, змушуючи ротор обертатися, при цьому роторна щелепа рухається синхронно з ротором. У фазі розширення повітря заповнює закритий об'єм, що утворюється спіральним жолобом, щелепою ротора та корпусом експандера. На основі цього принципу був створений прототип шнекового експандера, а також розроблена експериментальна установка для оцінки його продуктивності [14]. Тестування показало, що максимальна загальна ефективність досягає 55% при впускному тиску 1,5 МПа та швидкості 2800 об/хв. Найвищий момент обертання сягає 100 Н·м, а максимальна вихідна потужність – близько 22 кВт при мінімальному споживанні повітря близько 60 кг/кВт·год.

Сюй та ін. [15] представили новий тип двигуна на стисненому повітрі, що базується на механізмі з двома роторами. Однією з ключових переваг цієї конструкції є здатність змінювати об'єм кожного циліндра в чотири рази протягом одного оберту вихідного валу завдяки спеціальній системі диференціального швидкісного приводу. Таким чином, двигун із двома роторами можна прирівняти до пневматичного поршневого двигуна з 32 циліндрами однакового об'єму. Результати моделювання засвідчили, що максимальний момент обертання двигуна з двома роторами досягає 100 Нм при швидкості 450 об/хв і тиску впуску 0,6 МПа, що майже втричі перевищує показники традиційного поршневого двигуна.

Навіть за умов високого тиску стиснене повітря містить значно менше енергії порівняно з іншими джерелами енергії для транспорту, такими як рідке чи газоподібне паливо та акумулятори. Зокрема, енергетичний вміст стисненого повітря становить лише 0,5% від енергії бензину та 1,5% від енергії стисненого природного газу (CNG). Подібним чином енергоємність стисненого повітря суттєво поступається акумуляторам, зокрема свинцево-кислотним (Pb-acid), нікель-кадмієвим (NiCd), нікель-металогідридним (NiMH) та літій-іонним (Li-ion). Хоча акумулятори значно важчі за стиснене повітря і характеризуються меншою питомою енергією на одиницю маси, за обсягом вони залишаються ефективнішими. Для порівняння, стиснене повітря забезпечує лише 12% енергії, доступної в літій-іонних акумуляторах [16, 17].

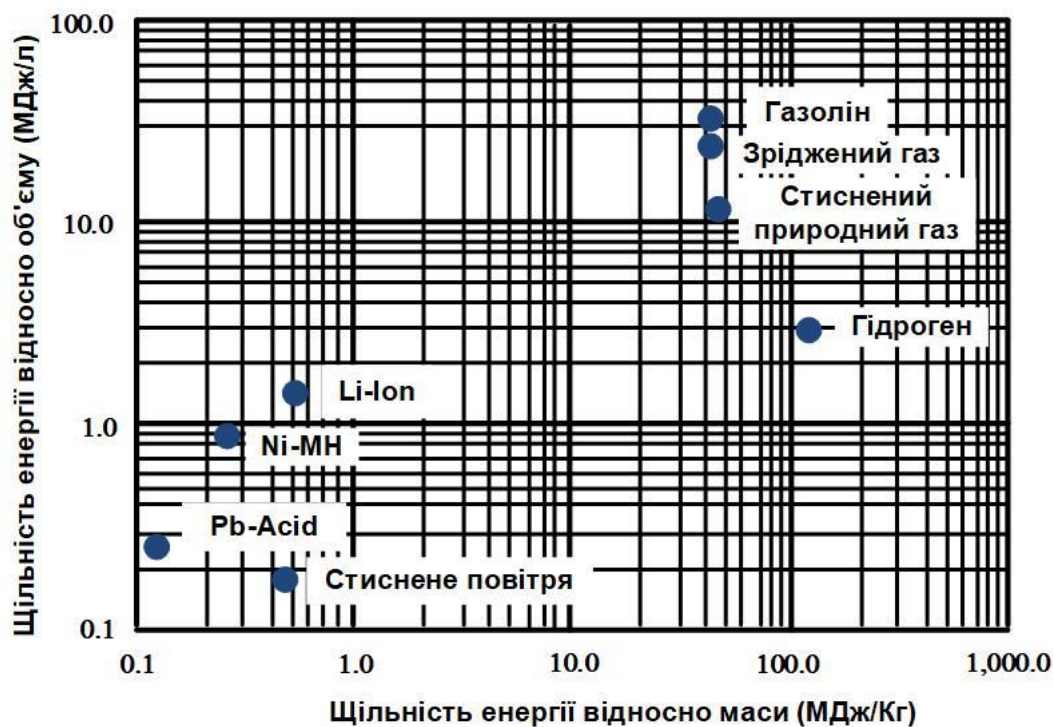


Рисунок 1 – Інфограма енергетичної ефективності різних джерел енергії [16]

Низька енергетична щільність стисненого повітря є значною перешкодою, яка може спричинити низьку динамічну продуктивність двигуна чи транспортного засобу. Ліу та ін. [18] підрахували, що енергетична щільність стисненого повітря становить 370 кДж/кг при тиску зберігання 20 МПа, що значно менше, ніж у дизельного чи бензинового палива. Для забезпечення безперервного постачання стисненого повітря під час роботи необхідно обмежувати потужність двигуна чи швидкість транспортного засобу. Крім того, балони для зберігання повітря повинні мати значний об'єм, щоб вміщувати достатню кількість стисненого повітря, що ускладнює просторову організацію транспортного засобу.

Високі енергетичні втрати під час роботи є ще одним суттєвим технічним бар'єром. Через низьку енергетичну щільність необхідно підвищувати тиск зберігання стисненого повітря, що призводить до значних втрат під час регулювання тиску. У пневматичних двигунах тиск у циліндрі після розширення повітря зазвичай залишається вищим за атмосферний, що свідчить про неповне перетворення енергії стисненого повітря на вихідну потужність. Це може також викликати втрати енергії через насос двигуна під час викиду. Крім того, втрати потоку виникають під час впуску повітря через високу швидкість потоку та конструктивні особливості клапанної системи [19].

Загалом, через ці втрати ефективність пневматичного двигуна є досить низькою порівняно з традиційними двигунами внутрішнього згоряння. Експериментальні та симуляційні дослідження показують, що ефективність пневматичного двигуна становить приблизно 20%, що є головним недоліком цієї технології порівняно з BEV та HEV.

Процес регулювання стисненого повітря створює низькі температури в певних ділянках труб чи клапанів через ефект Джоуля-Томсона, що може спричинити обмерзання двигуна після тривалої роботи.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є аналіз використання автомобілів з пневматичними двигунами, визначення переваг і недоліків автомобілів з пневматичним приводом. Також формування конструктивної схеми пневмотрансмісії автомобіля. Для реалізації мети статті необхідно визначити, які конструкції пневматичних двигунів використовуються в автомобілях, визначити, який двигун буде використовуватися і основні його робочі характеристики, запропонувати пневмотрансмісію дослідного зразка автомобіля.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Повітря є природним ресурсом і вільно доступне в атмосфері. Його можна зберігати після стиснення до необхідного тиску, наприклад, 90–150 psi. Це єдине джерело, яке можна зберігати під

дуже високим тиском без втрат навіть через тривалий час. Стиснене повітря може бути ефективною альтернативою для легкових транспортних засобів, які наразі спричиняють забруднення через використання викопного палива, що негативно впливає на екологічний баланс та здоров'я населення.

Стиснене повітря є найбільш стійким джерелом енергії. Воно не залежить від змін температури чи погодних умов. Після стиснення повітря може бути використане в будь-який момент без втрати тиску. Таким чином, його застосування є більш вигідним, ніж використання інших альтернатив викопному паливу. Наприклад, акумулятори потребують постійного обслуговування під час заряджання та розряджання, воднева енергетика має проблеми зі зберіганням і є дуже дорогою, а вітряні турбіни та сонячні батареї потребують додаткових пристроїв для зберігання енергії (наприклад, високовольтних конденсаторів або акумуляторів), що спричиняє додаткові витрати.

За конструкцією автомобільні повітряні двигун поділяються на дво- і чотиритактні поршневі, шибєрні (пластинчасті) двигуни.

При подачі стисненого повітря в робочу камеру пневматичного пластинчастого двигуна виникають сили, що діють на пластини 3, обмежуючи обсяг камери (рисунк 2). У зв'язку з ексцентричним розташуванням ротора 1 щодо статора 2 ділянки пластин різні, тому і сили, що діють на них, розрізняються за розмірами. У точці, після якої обсяги робочих камер починають зменшуватися, робиться отвір для відведення відпрацьованого повітря. З отриманих всіх прикладених зусиль виникає крутний момент, який призводить до обертання ротора, під час якого збільшується обсяг частини робочих камер, за рахунок чого стиснене повітря, що міститься в цих камерах, розширюється. Розширювальні роботи, що виконуються при цьому, перетворюються в додаткову механічну енергію обертання ротора.

Кількість пластин пневматичного двигуна визначає його ККД, умови пуску і швидкість розгону (розгін), а також рівномірність обертання. Стандартні конструкції мають 3-5 пластин, в особливих випадках їх кількість збільшують до 10. Доступні як реверсивні, так і неревєрсивні пластинчасті пневматичні двигуни.

До недоліків ковзаючих пневматичних двигунів можна віднести необхідність рясного мастила і низьку герметичність робочих камер, що призводить до підсмоктування повітря, а значить і до зниження ККД. Діапазон потужностей пластинчастих пневматичних двигунів становить 0,05 – 20 кВт, діапазон швидкостей – 30 – 20000 об/хв.

Часто конструкція пластинчастого пневматичного двигуна включає в себе додаткові комплектуючі: редуктор (частіше планетарний), який забезпечує необхідну споживачеві швидкість обертання, і відцентровий регулятор. Останній дозволяє обмежити обороти холостого ходу і забезпечити його сталість в певних межах при коливаннях навантаження.

Пластинчасті пневматичні двигуни широко використовуються в різноманітних спеціальних пристроях і пристроях, що працюють на стисненому повітрі.

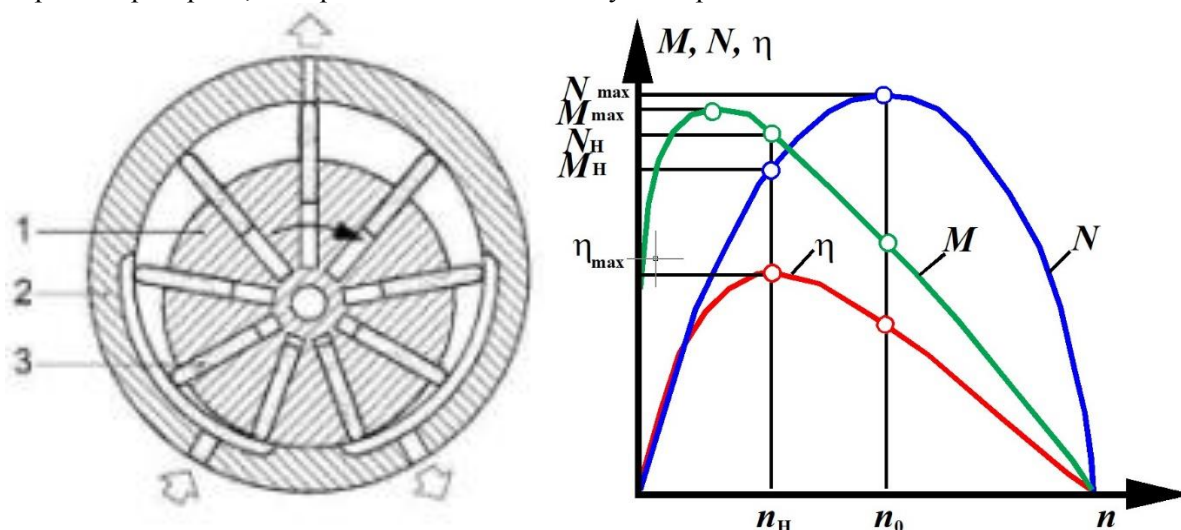


Рисунок 2 – Шибєрний (пластинчастий) мотор Рисунок 3 – Основні робочі характеристики пневмомоторів

У роботі пневматичних двигунів необхідна наявність такого стійкого стану, при якому досягається максимальна продуктивність машини. Цей режим відповідає статичним характеристикам крутного моменту M , потужності N і загальному ККД, визначеним теоретично або експериментально при постійній частоті обертання n (рисунок 3).

Як видно з рисунка 3, потужність пневматичного двигуна досягає максимального значення $N_{\max}$ при частоті обертання $n_0 \sim 0,5 n_{\text{хх}}$ (де $n_{\text{хх}}$ - частота обертання холостого ходу), крутний момент має найбільше значення $M_{\text{таq}}$ при частоті обертання, близької до нуля.

Номінальною частотою обертання пневматичного двигуна прийнято вважати його величину, при якій відбувається максимальний ККД двигуна. Для двигунів загального призначення з додатним об'ємом $v=(0,30\ldots 0,35)N_{\text{хх}}$. Найбільший ККД пневматичного двигуна досягається саме при номінальній частоті обертання, а найбільший технічний ККД досягається при максимальній потужності.

У паспортних характеристиках пневматичних двигунів зазвичай вказується максимальна потужність і відповідна частота обертання при робочому тиску стисненого повітря, а також номінальна частота обертання.

Пропонується пневмотрансмісія, яка складається з пневматичної виконавчої частини та електричної частини забезпечення і керування (рисунок 4). Електрична частина забезпечення і керування (електробатарея і контролер) задіяна для живлення компресора і керування клапаном подачі стисненого повітря. Пневматична виконавча частина забезпечує формування робочого тіла (стисненого повітря) і його подачу до виконавчого шибєрного мотора.

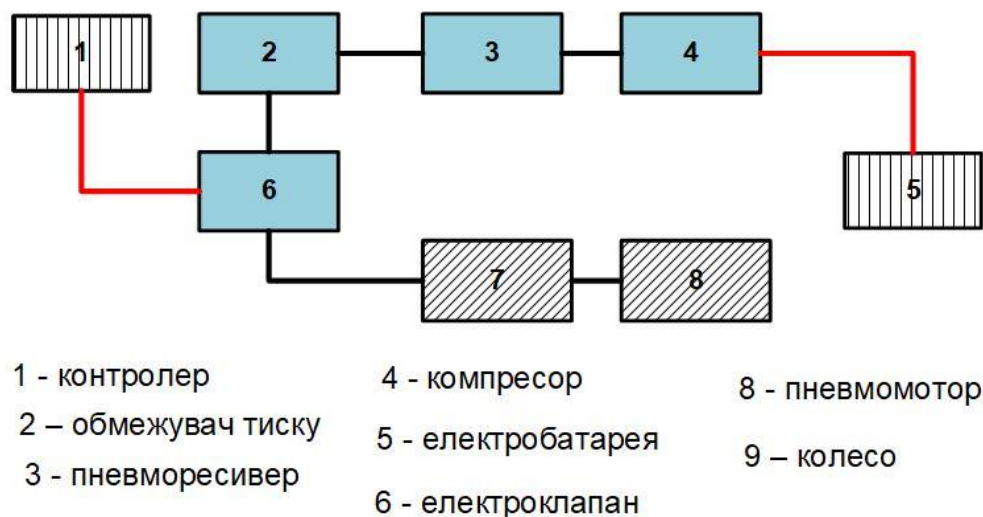


Рисунок 4 – Структурна схема пневмотрансмісії

Головною проблемою використання пневмодвигуна на мобільному (автономному) транспортному засобі залишається його малий пробіг, обумовлений обмеженим обсягом запасеного стисненого робочого тіла (балонами зі стисненим повітрям) і непродуктивними витратами енергії, пов'язаними з високими контактними тисками та, відповідно, виникаючими значними силами тертя у місцях рухомих спряжень, протіканнями повітря через рухомі спряження, динамічними перенавантаженнями окремих ланок кінематичного ланцюга. Отже, підвищення ефективності використання пневмодвигуна вбачається у визначенні раціональних параметрів елементів двигуна з кільцевим ротором та пошуку нових технічних рішень, направлених на зменшення статичних і динамічних сил опору руху, а також контактних тисків у місцях рухомих спряжень, оскільки існуючі конструкції двигунів такого типу передбачають значне навантаження рухомих ущільнень, проковзування робочого кільця відносно ротора, що веде до швидкого зношування ущільнень, зниження к.к.д. та перевитрати стисненого повітря (робочого тіла).

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Хоча САВ показує гірші результати порівняно з бензиновими та електричними автомобілями за показниками, наведеними в таблиці 1, можуть бути можливості для поліпшення життєздатності повітряних автомобілів. По-перше, можна застосувати стратегії для збільшення дальності руху САВ (хоча з компромісами). По-друге, повітряний автомобіль може мати вищу корисність у певних

застосуваннях, відмінних від міських автомобілів. Нарешті, якщо аналізувати за екологічними показниками, включаючи викиди з вихлопної труби та місцеві забруднюючі речовини, CAV можна вважати переважним у порівнянні з бензиновими автомобілями.

На даний момент CAV страждає від такої обмеженої дальності руху, що їх не можна використовувати як альтернативу існуючим автомобілям. Хоча можуть бути можливості для покращення цього фатального недоліку через різноманітні стратегії, спрямовані на підвищення енергетичного запасу, паливної економії або можливостей заправки, ці стратегії часто мають компроміси, які обмежують їх ефективність.

Дальність руху можна покращити, збільшивши максимальний тиск у баку зберігання, але ця перевага буде частково компенсована зниженням ефективності процесу розширення повітря. Додаткова вага пального також зменшить паливну економію. Крім того, майбутні дослідження повинні будуть розглянути більші термічні коливання, які виникатимуть при розширенні газу з таких великих тисків.

Альтернативно, дальність руху може бути покращена за рахунок збільшення розміру баків зберігання на борту. Однак маса додаткового пального значно збільшить загальну вагу автомобіля, що призведе до зменшення паливної економії. Крім того, буде важко встановити значно більший повітряний бак у маленькому корпусі CAV.

Третім варіантом для покращення дальності, запропонованим виробниками CAV, є обладнання автомобіля на борті компресором повітря. Ця стратегія дозволила б водіям заправляти свої автомобілі на ходу і не залежати від станцій заправки. Однак цей варіант має кілька проблем, зокрема обмеження енергії, необхідної для використання бортового пального для живлення пристрою для заправки автомобіля. Крім того, реалістичність розробки маленького, легкого компресора для застосувань з високим тиском є невизначеною. З огляду на ці проблеми, переваги цієї стратегії тут не оцінюються.

Нарешті, більш реалістичною стратегією може бути використання рекуперативного гальмування для підвищення дальності та паливної економії. Ця опція також зменшила б екологічні наслідки та експлуатаційні витрати без компромісів в продуктивності, властивих попереднім стратегіям. В рамках цієї стратегії під час гальмування пневматичний двигун діє як компресор, поглинаючи механічну потужність від осей для часткового поповнення баку з стисненим повітрям. Ця форма гібридизації була б аналогічною до гібридних гідравлічних вантажівок, які наразі експлуатуються. Деякі дослідження навіть вказують, що така стратегія може бути реалістичним і економічно вигідним варіантом [4].

Хоча CAV, як в даний час задумано для міського водіння, не є переконливою альтернативою існуючим автомобілям, можуть бути інші ситуації або ніші, в яких технологія більш підходить. Деякі з цих можливостей можуть потребувати подальшого вивчення.

Одним із альтернативних застосувань CAV може бути використання їх як повільних, короткоспрямованих автомобілів, подібно до електричних автомобілів для сусідства. Низька швидкість автомобіля підвищила б паливну економію, а короткі відстані, у поєднанні з маленькими компресорами повітря для домашнього використання, зменшили б обмеження дальності руху CAV. Якщо повітряні автомобілі можуть бути показані як конкурентоспроможні електричним автомобілям у цьому контексті, ці сусідські автомобілі можуть стати функціональною альтернативою існуючим виборам.

Крім того, CAV можуть бути доречними для використання в певних складних умовах. Унікальним аспектом CAV є відсутність згоряння або електричних іскр під час роботи. Ця риса може зробити повітряні автомобілі придатними для застосувань у погано вентильованих або з низьким рівнем кисню, що обмежує використання бензинових двигунів, або у вибухонебезпечному середовищі, що може бути проблематичним як для бензинових, так і для електричних автомобілів. Використання CAV у таких ситуаціях буде аналогічним до сучасного використання промислових пневматичних двигунів, які часто застосовуються в таких умовах.

Хоча повітряні автомобілі показують гірші результати порівняно з бензиновими та електричними автомобілями за показниками, проаналізованими в цьому дослідженні, є певні екологічні проблеми, в яких CAV перевершують бензинові автомобілі. Оскільки CAV не має викидів з вихлопної труби, він не сприяє локальному накопиченню критерійних та токсичних забруднюючих речовин. Якщо виробництво електрики для живлення CAV відбувається поза межами населених пунктів, повітряні автомобілі можуть мати менший загальний вплив на здоров'я, ніж бензинові автомобілі. Однак ретельний аналіз цих ефектів виходить за рамки цього документу.

Більш того, оскільки CAV можуть замінити бензинові автомобілі, вони можуть зменшити споживання нафти в транспортному секторі. Однак для того, щоб це зменшення мало вимірювальний вплив на загальне споживання нафти в США, необхідне широке впровадження CAV. Якщо CAV складали б 1.0% парку легкових автомобілів США, вони щорічно заміщували б 10.3 мільйонів барелів нафти, що становить 0.21% річного споживання в США [19, 20]. Проте ці додаткові вигоди не обмежуються лише CAV і також будуть реалізовані електричними автомобілями.

ВИСНОВКИ

Екологічні та економічні проблеми, які створюють легкові автомобілі, є значними і вимагають широкого спектру еволюційних та революційних рішень. Хоча CAV пропонують потенціал для вирішення цих проблем, аналіз, що міститься в цьому дослідженні, показує, що їх застосування обмежено поганою продуктивністю автомобілів та високими екологічними наслідками. CAV показує гірші результати, ніж бензинові та електричні автомобілі за показниками дальності руху, вуглецевого сліду та витрат на паливо.

Проведено огляд досліджень пневматичних приводів, що сприяло створенню різних прототипів двигунів і транспортних засобів. Починаючи з 1990-х років, було проведено чимало досліджень пневматичного приводу, що сприяло створенню різних прототипів двигунів і транспортних засобів. Однак пневматичний привід у транспортних засобах залишається менш популярним порівняно з іншими альтернативними енергетичними технологіями, такими як BEV або HEV.

Було виявлено, що однією з основних технічних перешкод є значні енергетичні втрати стисненого повітря під час роботи. Через низьку енергетичну щільність виникає необхідність у підвищенні тиску зберігання стисненого повітря, що, у свою чергу, може призводити до великих втрат під час регулювання тиску при вивільненні повітря з балона. Під час роботи пневматичного двигуна тиск у циліндрі зазвичай перевищує атмосферний після розширення стисненого повітря, що свідчить про недостатнє перетворення енергії на вихідну потужність. Це також може спричиняти втрати енергії через насос двигуна під час викиду. Додатково, через високу швидкість потоку та конструкцію системи клапанів можуть виникати суттєві втрати потоку під час впуску стисненого повітря.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Y. Fang, Y. Lu, X. Yu, A.P. Roskilly, Experimental study of a pneumatic engine with heat supply to improve the overall performance, *Appl. Therm. Eng.* 134 (2018) 78–85.
2. Y. Shi, J.P. Sun, M.L. Cai, Q.Y. Xu, Study on the temperature compensation technology of air-powered engine, *J. Renew. Sustain. Energy* 7 (2015).
3. Verma, S. Air Powered Vehicles. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, Vol. 1, 2008, pp. 54–56.
4. Транспортні енергетичні установи (традиційні, нетрадиційні та альтернативні), принцип роботи та особливості будови: [підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / Ю.Ф. Гутаревич, Л.П. Мержиєвська, О.В. Сирота, Д.М. Тріфонов. К.: НТУУ, 2015. - 243 с.
5. H. Liu, Y. Chen, G.L. Tao, G.Z. Jia, W.H. Ding, Research on the displacement and stroke-bore ratio of the air-powered engine, in: *Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control*, 2005, pp. 381–384.
6. Y. Chen, H. Liu, G.L. Tao, Simulation on the port timing of an air-powered engine, *Int. J. Vehicle Des.* 38 (2005) 259–273.
7. J.-Q. Hu, X.-L. Yu, L. Liu, X.-H. Nie, Dynamic characteristics of in-cylinder flow field in air-powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 41 (2007) 1912–1915.
8. R. Song, X. Fu, M. Cai, Non-dimensional modeling and simulation analysis of air powered engine, *Appl. Mech. Mater.* 278–280 (2013) 307–314.
9. Q.Y. Xu, Y. Shi, Q.H. Yu, M.L. Cai, Virtual prototype modeling and performance analysis of the air-powered engine, *Proc. Int. Mech. Eng. C-J. Mech.* 228 (2014) 2642–2651.
10. Q. Xu, M. Cai, Y. Shi, Dynamic heat transfer model for temperature drop analysis and heat exchange system design of the air-powered engine system, *Energy* 68 (2014) 877–885.
11. Y. Shi, J.P. Sun, M.L. Cai, Q.Y. Xu, Study on the temperature compensation technology of air-powered engine, *J. Renew. Sustain. Energy* 7 (2015).
12. Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, Working characteristics of two types of compressed air engine, *J. Renew. Sustain. Energy* 8 (2016).

13. W. He, Y. Wu, C. Ma, G. Ma, Performance study on three-stage power system of compressed air vehicle based on single-screw expander, *Sci. China Technol. Sci.* 53 (2010) 2299–2303.
14. Y.-T. Shen, Y.-R. Hwang, Design and implementation of an air-powered motorcycles, *Appl. Energy* 86 (2009) 1105–1110.
15. L. Liu, X.-L. Yu, Optimal piston trajectory design of air powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 40 (2006) 2107–2111.
16. Wang, M. GREET 1.5—Transportation Fuel Cycle Model. Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., 1999, Vol. 1, Table 3.3.
17. Linden, D., and T. Reddy. Secondary Batteries. In *The Battery Handbook*, McGraw-Hill, New York, 2001, Chap. 22.
18. G. Jia, X. Wang, G. Wu, Study on ultrahigh pressure and large flow rate pneumatic on-off valve, *Jixie Gongcheng Xuebao/Chin. J. Mech. Eng.* 40 (2004) 77–81.
19. J.-L. Cai, X.-L. Yu, G.-J. Yuan, Y.-M. Shen, Influence of port timing on work process of air-powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 38 (2004) 65–69.
20. A. Koca, R. Bayindir, H. Gunes, M.A. Kunt, S. Sakar, Design and application of electromagnetic solenoid for valve mechanism on compressed air engines, *J. Fac. Eng. Archit. Gaz.* 26 (2011) 73–79.

REFERENCES

1. Y. Fang, Y. Lu, X. Yu, A.P. Roskilly, Experimental study of a pneumatic engine with heat supply to improve the overall performance, *Appl. Therm. Eng.* 134 (2018) 78–85.
2. Y. Shi, J.P. Sun, M.L. Cai, Q.Y. Xu, Study on the temperature compensation technology of air-powered engine, *J. Renew. Sustain. Energy* 7 (2015).
3. Verma, S. Air Powered Vehicles. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, Vol. 1, 2008, pp. 54–56.
4. Transportni enerhetychni ustanovy (tradytsiini, netradytsiini ta alternatyvni), pryntsyp roboty ta osoblyvosti budovy: [pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakl.] / Yu.F. Hutarevych, L.P. Merzhyievs'ka, O.V. Syrota, D.M. Trifonov. K.: NTU, 2015. – 243 s.
5. H. Liu, Y. Chen, G.L. Tao, G.Z. Jia, W.H. Ding, Research on the displacement and stroke-bore ratio of the air-powered engine, in: *Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control*, 2005, pp. 381–384.
6. Y. Chen, H. Liu, G.L. Tao, Simulation on the port timing of an air-powered engine, *Int. J. Vehicle Des.* 38 (2005) 259–273.
7. J.-Q. Hu, X.-L. Yu, L. Liu, X.-H. Nie, Dynamic characteristics of in-cylinder flow field in air-powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 41 (2007) 1912–1915.
8. R. Song, X. Fu, M. Cai, Non-dimensional modeling and simulation analysis of air powered engine, *Appl. Mech. Mater.* 278–280 (2013) 307–314.
9. Q.Y. Xu, Y. Shi, Q.H. Yu, M.L. Cai, Virtual prototype modeling and performance analysis of the air-powered engine, *Proc. Int. Mech. Eng. C-J. Mech.* 228 (2014) 2642–2651.
10. Q. Xu, M. Cai, Y. Shi, Dynamic heat transfer model for temperature drop analysis and heat exchange system design of the air-powered engine system, *Energy* 68 (2014) 877–885.
11. Y. Shi, J.P. Sun, M.L. Cai, Q.Y. Xu, Study on the temperature compensation technology of air-powered engine, *J. Renew. Sustain. Energy* 7 (2015).
12. Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, Working characteristics of two types of compressed air engine, *J. Renew. Sustain. Energy* 8 (2016).
13. W. He, Y. Wu, C. Ma, G. Ma, Performance study on three-stage power system of compressed air vehicle based on single-screw expander, *Sci. China Technol. Sci.* 53 (2010) 2299–2303.
14. Y.-T. Shen, Y.-R. Hwang, Design and implementation of an air-powered motorcycles, *Appl. Energy* 86 (2009) 1105–1110.
15. L. Liu, X.-L. Yu, Optimal piston trajectory design of air powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 40 (2006) 2107–2111.
16. Wang, M. GREET 1.5—Transportation Fuel Cycle Model. Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., 1999, Vol. 1, Table 3.3.
17. Linden, D., and T. Reddy. Secondary Batteries. In *The Battery Handbook*, McGraw-Hill, New York, 2001, Chap. 22.

18. G. Jia, X. Wang, G. Wu, Study on ultrahigh pressure and large flow rate pneumatic on-off valve, *Jixie Gongcheng Xuebao/Chin. J. Mech. Eng.* 40 (2004) 77–81.
19. J.-L. Cai, X.-L. Yu, G.-J. Yuan, Y.-M. Shen, Influence of port timing on work process of air-powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 38 (2004) 65–69.
20. A. Koca, R. Bayindir, H. Gunes, M.A. Kunt, S. Sakar, Design and application of electromagnetic solenoid for valve mechanism on compressed air engines, *J. Fac. Eng. Archit. Gaz.* 26 (2011) 73–79.

B. Mokriak. Analysis of Research on Pneumatic Automotive Engines

Compressed air is already being actively used in various types of energy systems: for turbocharging internal combustion engines, in hybrid energy systems under partial engine operating conditions, in integrated installations with variable operating cycles combining an internal combustion engine (ICE) and a pneumatic engine where only compressed air is used. In such systems, exhaust air with residual pressure can be reused in other cylinders or stored in tanks for further use. Air can be stored under very high pressure without loss, even over a long period. Compressed air is the most stable source of energy. It is not dependent on temperature changes or weather conditions. Once compressed, air can be used at any moment without pressure loss.

The disadvantages of pneumatic vehicles have been identified. In particular, even under high pressure conditions, compressed air contains significantly less energy compared to other energy sources for transportation, such as liquid or gaseous fuels and batteries. The low energy density of compressed air is a significant obstacle that may lead to low dynamic performance of the engine or vehicle. To ensure continuous compressed air supply during operation, engine power or vehicle speed must be limited. Moreover, the air storage tanks must have a large volume to hold a sufficient amount of compressed air, which complicates the spatial layout of the vehicle.

A pneumatic transmission is proposed, consisting of a pneumatic actuator and an electric control and supply unit. The electric unit (battery and controller) is used to power the compressor and control the compressed air supply valve. The pneumatic actuator forms the working medium (compressed air) and delivers it to the vane-type actuator motor.

Keywords: pneumatic vehicles, compressed air, pneumatic transmission, vane motor, rotary vane engine.

МОКРЯК Богдан Юрійович, аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: bohdan.y.mokriak@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0006-8990-4226>

Bohdan MOKRIAK, PhD student, Department of Machine Design and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, e-mail: bohdan.y.mokriak@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0006-8990-4226>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1736

Монастирський Ю. А., Борис Д. С.
Криворізький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СВЕРДЛОВИННОГО ГІДРОМОНІТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ВІДБІЙЦІ МАЛОМІЦНИХ ЗАЛІЗНИХ РУД

При розробці технічного завдання на створення технологічного обладнання для свердловинного гідромоніторного видобутку багатих маломіцних залізних руд в шахтах необхідні знання параметрів устаткування які необхідно забезпечити в процесі роботи. Застосування свердловинного гідромоніторного руйнування у порівнянні з вибуховим знизить викиди шкідливих речовин в атмосферу шахти, дозволить використати шахтну воду для відбійки руди і при певних умовах може бути ефективніше за вибухове руйнування. На засадах енергетичного порівняння у грошовому еквіваленті вибухової та гідромоніторної відбійки встановлені закономірності зміни продуктивності гідромоніторного руйнування при перевищенні яких краще застосовувати гідромоніторне руйнування. Закономірності встановлені для умов масової відбійки руди, при якій витрати вибухових речовин мінімальні. Встановлені закономірності від питомих витрат чотирьох різних вибухових речовин які застосовуються в залізрудних шахтах. Вартість вибухових речовин лінійно впливає на продуктивність гідромоніторного руйнування. При однакових питомих витратах вибухових речовин різного типу різниця в продуктивності гідромоніторного руйнування досягає двох разів. При збільшенні питомих витрат вибухових речовин одного виду з 0,2 кг/т до 0,6 кг/т продуктивність гідромоніторного руйнування зменшується в 2,8 рази. Мінімальна ефективна продуктивність гідромоніторного руйнування у 3 т/год досягається при питимих витратах Акваніту у 0,6 кг/т. В якості енергетичного устаткування запропоновано використання насосів шахтного водовідливу ЦНС-38-220 та ЦНС-60-330 і для даних насосів встановлені ефективні межі продуктивності відбійки. Для маритових руд з коефіцієнтом міцності 1-2 потрібно забезпечити продуктивність гідромоніторної відбійки на рівні 10 т/год для насосу ЦНС-38-220 та 20 т/год для насосу ЦНС-60-330.

Ключові слова: свердловинний гідромонітор, відбійка, параметри, продуктивність, залізна руда, вибухові речовини.

ВСТУП

Експериментальні дослідження одного з авторів в виконанні в Криворізьких залізрудних шахтах показали можливість ефективного застосування для відбійки багатих залізних руд (Fe_2O_3) свердловинних гідромоніторів [1] та впровадження на цій основі ресурсозберігаючої технології підземного відпрацювання покладів системами підповерхового обвалення [2]. В період проведення тих шахтних експериментів впровадження та розвиток нової технології руйнування рудного масиву були зупинені в наслідок відсутності робочих зразків технологічного обладнання для свердловинного гідромоніторного руйнування, а виділених коштів вистачило тільки на дослідницькі зразки шпурової та свердловинної гідромоніторних установок. Наразі питання впровадження нових технологічних рішень при підземній розробці корисних копалин, які дозволяють знизити вартість видобутку, використати наявну в шахтах воду для виконання технологічних функцій руйнування та транспортування руди, дуже на часі. Цим і обумовлена актуальність питання розробки свердловинного гідромоніторного обладнання для відбійки залізних руд, у тому числі на першому етапі - обґрунтування технічних умов та параметрів експлуатації обладнання для розробки технічного завдання на проектування та виготовлення дослідницьких і промислових зразків, а саме мінімального ефективного значення продуктивності гідромоніторного обладнання.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.

Для відбійки маломіцних залізних руд зараз використовують виключно відбійку за допомогою вибухових речовин [3], методи та методики якої постійно вдосконалюються [4, 5]. Одночасно проводиться все більше досліджень щодо руйнування маломіцних руд та порід струменями води [6, 7], у тому числі й залізних руд [8]. Гідравлічне руйнування гірських порід у порівнянні з вибуховим спричиняє менші викиди шкідливих речовин в атмосферу шахт, що є дуже важливим при визначенні параметрів провітрювання та подачі свіжого повітря в робочі вибої шахт. В роботах висвітлюються різні питання руйнування масиву, у тому числі врахування особливостей руйнування маритових залізних руд струменями води в залежності від кута зустрічі напряму струменю з нашаруванням гірських порід [9]. Відзначається, що є певні межі основних параметрів свердловинної гідромоніторної відбійки, у тому числі продуктивність відбійки, при яких заміна вибухової відбійки на свердловинну гідромоніторну забезпечить кращі техніко-економічні показники одного з основних виробничих процесів - відбійки.

Продуктивність визначає час гідровідбійки, що впливає на загальний час процесу відбійки і є похідною від міцності порід, питомої витрати води і подачі насоса, потрібна продуктивність насоса визначає його тип та відповідно вартість, як насоса так і витрати, пов'язані з генерацією одного кубічного метра технологічної води з необхідним тиском. Певно існує продуктивність гідровідбійки при якій процес гідромоніторного руйнування буде ефективнішим за процес вибухової відбійки.

При порівнянні різних способів руйнування гірського масиву умовою вибору способу відбійки та подрібнення рекомендують приймати витрати енергії на подрібнення у грошовому еквіваленті [10], що й прийнято в дані роботі.

Вибухову відбійку варто розділити на такі області застосування, що істотно відрізняються одна від одної параметрами вибухових робіт: масова відбійка руд глибокими свердловинами при очисній виїмці, відбійка глибокими свердловинами в стиснутих умовах при утворенні відрізних щілин і підсікання, відбійка шпурами при проходці гірничих виробок. Для кожної області застосування ефективна продуктивність свердловинного гідромоніторної відбійки буде різною. При цьому максимальні величини продуктивності будуть при масовій відбійці, оскільки ці умови є найбільш сприятливими для вибухової відбійки і в яких техніко-економічні показники вибухової відбійки найкращі. Саме для цих умов і виконані дані дослідження.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Якщо використати принцип вибору способу відбійки руд із застосуванням вибухових робіт чи свердловинного гідромоніторного відбивання по витратам енергії на подрібнення у грошовому еквіваленті, то у загальному випадку умова ефективності має вид:

$$\Sigma C_1 < \Sigma C_2, \quad (1)$$

де: ΣC_1 - вартість енергії, що витрачається на свердловинну гідромоніторну відбійку руди, грн/т, ΣC_2 - вартість енергії, що витрачається на вибухову відбійку руди, грн/т.

Вартість енергії, що витрачається на свердловинну гідромоніторну відбійку однієї тони руди:

$$\Sigma C_1 = c_1 \cdot E_1 = c_1 \cdot P_1 \cdot N_1, \text{ грн/т}, \quad (2)$$

де: c_1 - ціна електричної енергії, грн/кВт, E_1 - кількість енергії, що витрачається на руйнування однієї тони руди, кВт·год/т, P_1 - продуктивність свердловинного гідроруйнування по руді, т/год., N_1 - потужність електродвигуна насоса, кВт.

Вартість енергії, що витрачається на вибухову відбійку однієї тонни руди:

$$\Sigma C_2 = c_2 \cdot E_2 = 3,6 \cdot c_2 \cdot q_2 \cdot T, \text{ грн/т}, \quad (3)$$

де: 3,6 - перехідний коефіцієнт від МДж до кВт·год, c_2 - ціна одного кілограма вибухової речовини, грн/кг, E_2 - кількість енергії, що витрачається вибуховою речовиною на руйнування однієї тони руди, кВт·год/т, q_2 - питомі витрати вибухових речовин на руйнування однієї тони руди, кг/т, T - енергія (теплота) вибуху одного кілограму вибухової речовини, МДж/кг.

Після підстановки (2) і (3) у (1) отримуються умови при яких свердловинне гідромоніторне руйнування буде ефективніше бурі вибухового руйнування у виді:

$$\frac{c_2}{c_1} > \frac{E_1}{E_2}, \text{ чи } \frac{c_2}{c_1} > \frac{3,6 \cdot N_1}{T \cdot q_2 \cdot P_1}, \quad (4)$$

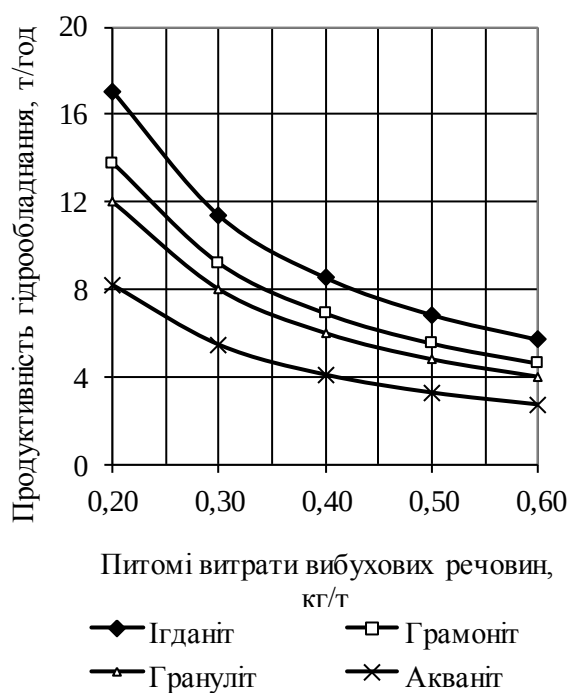
З урахуванням відомої залежності по визначенню потужності насоса від його подачі і напору виходить шукане значення продуктивності відбійки однієї тони свердловинним гідроруйнуванням

$$P_1 > \frac{0,0155 \cdot Q_1 \cdot H \cdot c_1}{T \cdot q_2 \cdot c_2}, \text{ т/год}, \quad (5)$$

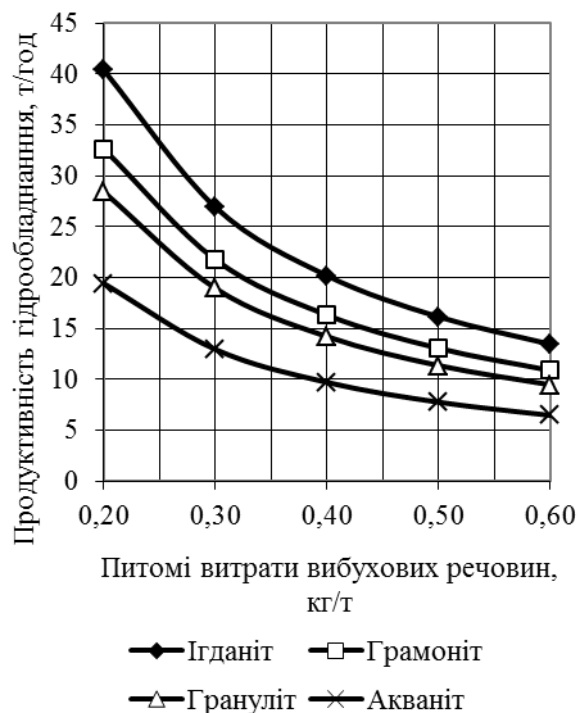
де Q_1 - подача насоса, куб.м/год, H - натиск насоса, м.

Установлені залежності (4 – 5) носять загальний характер і можуть бути трансформовані для конкретних умов.

Питомі витрати вибухових речовин при відбійці руд середньої і нижче середньої міцності на залізорудних шахтах Кривбасу коливається від 0,2 до 0,6 кг/т, у залежності від умов застосування, при цьому використовуються ігданіт ($T=3,8$ МДж/кг), граммоніт 79/21 ($T=4,7$ МДж/кг), грануліти АС-4 і АС-8, граммонал А-8 ($T=5,4$ МДж/кг) і акваніт ЗЛ ($T=7,9$ МДж/кг) [11]. Для свердловинної гідровідбійки в даний час найбільш перспективним є застосування в межах очисного блоку багатоколісних відцентрових насосів дільничного водовідливу ЦНС-38-220 і ЦНС-60-330. Після підстановки у формули (5) параметрів вибухових речовин та насосів, отримані графічні відображення закономірностей зміни продуктивності свердловинної гідромоніторної відбійки від питомих витрат вибухових речовин різного типу для зазначених насосів при відношенні цін на вибухову й електричну енергію, що діє на момент виконання досліджень (рис. 1).



А)



Б)

Рисунок 1 – Залежність мінімальної ефективної продуктивності гідрообладнання при масовій відбійці від питомих витрат вибухових речовин різних типів, при застосуванні насосів ЦНС-38-220 (А) та ЦНС-60-330 (Б)

При однакових умовах насос ЦНС-60-330 потребує практично двократного збільшення продуктивності гідромоніторного руйнування у порівнянні з насосом ЦНС-38-220 при тому що параметри цього насосу на напорі та подачі більше параметрів насоса ЦНС-38-220 в 1,5 рази.

При масовій відбійці багатих залізних руд свого часу була встановлена [11] залежність питомих витрат амоніта від міцності порід, яка описується формулою:

$$q_2 = 0.075 \cdot f + 0.125, \text{ кг/т}, \quad (5)$$

де f - коефіцієнт міцності руди (від 1 до 5).

З урахуванням взаємозв'язку між різними вибуховими речовинами формула (5) має вид:

$$q_2 = \frac{T_i}{T_a} \cdot (0.075 \cdot f + 0.125), \text{ кг/т}, \quad (6)$$

де T_i - теплота вибуху i -тої вибухової речовини яка використовується, МДж/кг, T_a – теплота вибуху амоніту, МДж/кг.

Після підстановки формула для визначення продуктивності свердловинної гідромоніторної відбійки прийме вид:

$$P_1 > \frac{0,04 \cdot Q_1 \cdot H \cdot c_1}{(f + 1,67) \cdot c_2}, \text{ т/год,} \quad (7)$$

Таким чином вперше встановлена закономірність мінімальної продуктивності свердловинного гідромоніторного руйнування від міцності руди та параметрів свердловинного гідромоніторного агрегату, яка дозволяє визначати необхідні параметри роботи свердловинного гідромоніторного агрегату. Продуктивність свердловинного гідромоніторного руйнування гірничих порід (руд) означеної міцності повинна бути не менше встановлених значень величин продуктивності для забезпечення ефективного використання у порівнянні з вибуховим руйнуванням.

При виборі способу масового відбивання масиву гірничих порід з міцністю від 1 до 5 експериментально встановлюється фактично досяжна продуктивність свердловинного гідромоніторного руйнування і порівнюється з визначеною за формулою (7), у випадку перевищення фактичної продуктивності теоретичної для відбійки ефективніше використовувати свердловинне гідромоніторне руйнування.

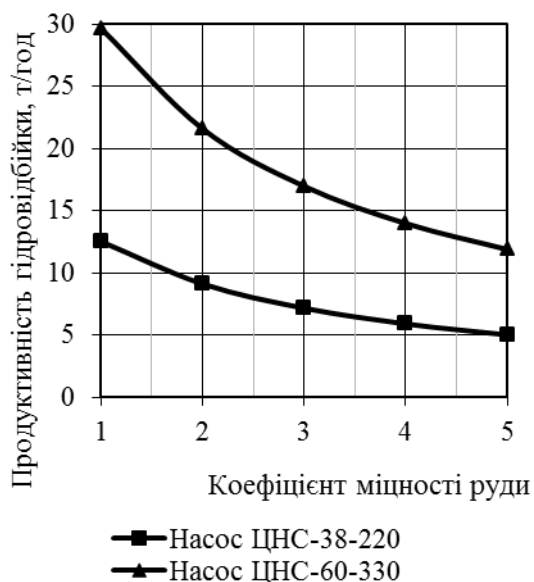
Закономірності зміни мінімальних значень продуктивності гідровідбійки при використанні шахтних насосних агрегатів дільничного водовідливу ЦНС-38-220, ЦНС-60-330 для середніх робочих параметрів роботи насосів мають вигляд рівномірно спадаючих кривих (рис. 2). Отримані значення продуктивності гідровідбійки є верхньою межею даної величини.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Підвищення ефективності та безпеки виробничого процесу відбійки залізних руд може бути досягнуто за рахунок впровадження свердловинного гідромоніторного руйнування. Встановлені умови при яких гідромоніторне руйнування буде ефективніше за вибухове руйнування гірничого масиву при відпрацюванні покладів багатих залізних руд нижче середньої міцності.

При виконанні операції масової відбійки руд мінімальна продуктивність гідроруйнування повинна бути не менше 6 т/год для насоса ЦНС-38-220 і 12 т/год для насоса ЦНС-60-330. В залежності від типу застосованих вибухових речовин продуктивність гідроруйнування змінюється, при збільшенні питомих витрат вибухових речовин продуктивність гідровідбійки зменшується. Так при використанні для відбійки грануліту та при застосуванні насосу ЦНС-60-330 при питомих витратах вибухової речовини у 0,2 кг/т продуктивність гідро відбійки повинна бути не менше 28 т/год, при збільшенні витрат вибухівки до 0,6 кг/т продуктивність зменшується до 6 т/год.

Рисунок 2 – Закономірності зміни мінімальних значень продуктивності гідровідбійки від коефіцієнта міцності руди при масовій відбійці.



Встановлені значення межевої продуктивності гідромоніторного руйнування дозволяють застосовувати їх при розробці технічного завдання на створення зразка свердловинного гідромоніторного агрегату.

ВИСНОВКИ

При відпрацюванні покладів маломіцних руд можливо зменшення витрат та підвищення безпеки відбійки залізних руд за рахунок використання відбійки без вибухових речовин. Впровадження в глибоких залізрудних шахтах України свердловинного гідромоніторного руйнування дозволить використати воду природного водопритоку з рудного масиву в якості технологічного інструменту для виконання одного з основних процесів підземних гірничих робіт – відбійки. При цьому необхідно що б свердловинний гідромоніторний агрегат забезпечив мінімально ефективну продуктивність руйнування на встановленому в даних дослідженнях рівні. Для найбільш

розповсюджених маритових залізних руд які мають коефіцієнт міцності 1-2 потрібно забезпечити продуктивність гідровідбійки на рівні 10-20 т/год в залежності від насосного обладнання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Тарасютин В. М., Гирин В. С., Монастырский Ю. А. Экспериментальные исследования процессов скважинной гидротехнологии в шахтных условиях. // Разработка рудных месторождений. - Кривой Рог: КТУ. Вып. 63.- 1998. С. 16–20.
2. Монастирський Ю. А. Технологія підповерхового обвалення при відпрацюванні багатих пухких залізних руд складних покладів. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ. Вип. 12.- 2008, С. 78–82.
3. Kosenko A. V. Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2021. № 1. Pp. 19–25. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>.
4. Kononenko M., Khomenko O. New theory for the rock mass destruction by blasting. Mining of Mineral Deposits. 2021. №15(2). Pp. 111–123. <https://doi.org/10.33271/mining15.02.111>.
5. Кононенко М. М., Хоменко О. Є., Косенко А. В. Чисельне моделювання лінії найменшого опору при підриванні зарядів. Збірник наукових праць НГУ. 2022. № 69. С. 43–57. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.043>
6. Liu S., Liu X., Chen J., Lin M. (2015). Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 28. № 3. Pp. 607–617. <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0305.023>.
7. Rochev V. (2018). Hydraulic borehole mining method possible application at Middle Larba alluvial gold field. E3S Web of Conferences: VII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources». 2018. № 56. P. 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185601025>.
8. Тарасютін В. М. Результати вивчення руйнування високоякісних маритових руд свердловинними гідромоніторами // Відомості Академії гірничих наук України.-1997.- № 2. С. 42-43.
9. Ковбик М. К. Визначення виходу фракційного матеріалу при руйнуванні маритових руд струменями води в залежності від напрямку їх зрізання. Збірник наукових праць НГУ. 2022. № 69-03 С. 35–42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.035>.
10. Goncharov S. A. Destruction of rocks, ways to improve its efficiency // Mining Journal. - 1996. - № 5. - С. 9-12.
11. Ткачук К. Н. Вибухові роботи у гірничорудній промисловості / К. Н. Ткачук, П. Й. Федоренко. - К.: Вища школа, 1990. - 296 с.

REFERENCES

1. Tarasiutyn V. M., Hyryn V. S., Monastyrskiy Yu. A. Eksperymentalnye yssledovaniya protsessov skvazhynnoi hydrotekhnolohyy v shakhtnykh uslovyiakh. // Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy. - Kryvoi Roh: KТУ. Vyp. 63.- 1998. S.16–20.
2. Monastyrskiy Yu. A. Tekhnolohiia pidpoverkhovoho obvalennia pry vidpratsiuvanni bahatykh pukhkykh zaliznykh rud skladnykh pokladiv. // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. – Dnipropetrovsk: NHU. Vyp. 12.- 2008, S.78–82.
3. Kosenko A.V. Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. Nauovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2021. № 1. Rr. 19–25. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>.
4. Kononenko M., Khomenko O. New theory for the rock mass destruction by blasting. Mining of Mineral Deposits. 2021. №15(2). Rr. 111–123. <https://doi.org/10.33271/mining15.02.111>.
5. Kononenko M.M., Khomenko O.Ie., Kosenko A.V. Chyselne modeliuвання linii naimenshoho oporu pry pidryvanni zariadiv. Zbirnyk naukovykh prats NHU. 2022. № 69. S. 43–57. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.043>
6. Liu S., Liu X., Chen J., Lin M. (2015). Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 28. № 3. Pr. 607–617. <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0305.023>.
7. Rochev V. (2018). Hydraulic borehole mining method possible application at Middle Larba alluvial gold field. E3S Web of Conferences: VII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources». 2018. № 56. R. 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185601025>.

8. Tarasiutin V.M. Rezultaty vyvchennia ruinuвання vysokoiakisnykh martytovykh rud sverdlovynnykh hidromonitoramy//Vidomosti Akademii hirnychokh nauk Ukrainy.-1997.- № 2.-С. 42-43.
9. Kovbyk M.K. Vyznachennia vykhodu fraktsiinoho materialu pry ruinuванні martytovykh rud strumeniamy vody v zalezhnosti vid napriamu yikh zrizannia. Zbirnyk naukovykh prats NHU. 2022. № 69-03 S. 35–42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.035>.
10. Goncharov S. A. Destruction of rocks, ways to improve its efficiency // Mining Journal. - 1996. - № 5. - S. 9-12.
11. Tkachuk K. N. Vybukhovi roboty u hirnychorudnii promyslovosti / K. N. Tkachuk, P. Y. Fedorenko. - K.: Vyshcha shkola, 1990. - 296 s.

Y. Monastyrskiy, D. Borys. Determination of the minimum effective productivity of borehole hydraulic monitoring equipment for the extraction of low-strength iron ores.

When developing technical specifications for technological equipment designed for borehole hydraulic monitoring extraction of high-grade, low-strength iron ores in mines, it is essential to understand the equipment parameters that must be maintained during operation. Using borehole hydraulic fragmentation compared to explosive methods will reduce harmful atmospheric emissions within mines, allow for the reuse of mine water for ore fragmentation, and, under certain conditions, could be more effective than explosive techniques. Based on an energetic cost comparison of explosive and hydraulic fragmentation methods, the study identifies productivity thresholds above which hydraulic monitoring fragmentation is preferable. The patterns have been established under conditions of large-scale ore blasting, where the consumption of explosives is minimized. These patterns relate to the specific consumption rates of four different types of explosives used in iron ore mines. The cost of explosives has a linear impact on the efficiency of hydraulic monitor ore breakage. Even at equal specific consumption levels of different explosive types, the difference in hydraulic monitor productivity can reach up to a factor of two. When the specific consumption of a single explosive type increases from 0,2 kg/ton to 0,6 kg/ton, the productivity of hydraulic monitor breakage decreases by a factor of 2,8. The minimum effective hydraulic monitor productivity of 3 tons per hour is achieved at a specific consumption of Aquanite of 0,6 kg/ton. Mine drainage pumps CNS-38-220 and CNS-60-330 are proposed as energy equipment, and their effective operational productivity limits for ore fragmentation have been established. For martite ores with a strength coefficient between 1 and 2, the required productivity levels for hydraulic fragmentation are 10 tons per hour when using pump CNS-38-220, and 20 tons per hour when using pump CNS-60-330. The introduction of downhole hydraulic monitoring fracturing in deep iron ore mines in Ukraine will allow the use of natural water inflow from the ore massif as a technological tool for performing one of the main processes of underground mining operations - breaking.

Keywords: borehole hydraulic monitor, ore fragmentation, parameters, productivity, iron ore, explosives.

МОНАСТИРСЬКИЙ Юрій Анатолійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет, e-mail: monastirskiy08@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8282-3929>

БОРИС Даниїл Сергійович, аспірант, Криворізький національний університет, e-mail: borys.kr@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0008-8239-1821>

Yurii MONASTYRSKYI, Doctor of Technical Sciences , Professor, Head of Automobile Facilities Department, Kryvyi Rih National University, e-mail: monastirskiy08@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8282-3929>

Daniil BORYS, Graduate Student of Kryvyi Rih National University, e-mail: borys.kr@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0008-8239-1821>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1737

Никончук В.М., Козак С.В.

Національний університет водного господарства і природокористування, м. Рівне, Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИНЦИПІВ ЗЕЛЕНОЇ ЛОГІСТИКИ В ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ

У статті розкрито концептуальні підходи до впровадження зеленої логістики в транспортно-логістичні процеси, з акцентом на необхідність зменшення екологічного впливу на навколишнє середовище. Розглянуто ключові аспекти, такі як скорочення викидів парникових газів, зменшення витрат енергії, а також використання новітніх технологій для досягнення ефективного управління логістичними потоками. Особливу увагу приділено значенню оптимізації транспортних маршрутів та вибору екологічно чистих видів транспорту, що дозволяють знизити рівень забруднення повітря та зменшити навантаження на навколишнє середовище. Водночас, розглядаються різні види транспорту, що базуються на альтернативних джерелах енергії, зокрема електричні та водневі транспортні засоби, що стають все більш актуальними у контексті змін клімату та глобальних екологічних ініціатив.

На основі аналізу методів «зеленої логістики» обґрунтовано економічні вигоди та виклики для підприємств, що прагнуть інтегрувати зелені технології у свою діяльність. Переваги, які отримують компанії, що переходять на сталий розвиток, включають не тільки зменшення витрат на енергоресурси, але й підвищення своєї конкурентоспроможності на ринку завдяки екологічному іміджу. Однак, автори відзначають певні труднощі, зокрема високі початкові інвестиції, що можуть бути необхідними для модернізації транспорту та інфраструктури, а також недостатню розвиненість екологічної інфраструктури в деяких регіонах. Враховуючи це, в статті надаються практичні рекомендації для підприємств, які впроваджують стратегії зеленої логістики (інноваційні рішення у процеси транспортування, зберігання та перевезення вантажів). Крім того, акцентується увага на необхідності розвитку інфраструктури для екологічно чистих транспортних засобів та підвищення обізнаності споживачів і громадськості щодо важливості сталого розвитку в галузі логістики.

Ключові слова: зелена логістика, екологічна стійкість, принципи «зеленої логістики», транспортно-логістична система, екологічні технології, цифровізація логістики.

ВСТУП

В умовах глобальних екологічних змін і зростання вимог до сталого розвитку, реалізація принципів зеленої логістики в транспортно-логістичній діяльності підприємств стає необхідною умовою для забезпечення ефективності та екологічної безпеки. Зелені ініціативи, спрямовані на зменшення шкідливого впливу логістичних процесів на навколишнє середовище, включають впровадження енергоефективних технологій, використання альтернативних видів палива та оптимізацію маршрутів, що дозволяє знизити викиди парникових газів та інші шкідливі речовини.

Важливим аспектом є також інтеграція цифрових технологій, що сприяють підвищенню ефективності управління логістичними потоками, зменшенню витрат на ресурси і паливо, а також зниженню впливу на екосистеми. В Україні, в умовах інтеграції до європейського ринку, підприємства стикаються з необхідністю адаптації своїх логістичних стратегій до нових вимог, що передбачають використання «зелених» технологій та розбудову екологічно чистої інфраструктури.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблематика зеленої логістики є актуальною темою для досліджень як в Україні, так і за кордоном. Закордонні вчені акцентують увагу на оптимізації логістичних процесів через інтеграцію зелених технологій, таких як використання альтернативних видів палива та електричних транспортних засобів. У працях [3,8,13,14,15] досліджуються економічна доцільність екологічних рішень та їх вплив на конкурентоспроможність підприємств, зокрема в умовах глобальних змін клімату. Крім того, особлива увага приділяється регулюванню та розвитку політики підтримки зеленої логістики на рівні урядів та міжнародних організацій. Зелена логістика визначається як система управління матеріальними потоками, що спрямована на мінімізацію впливу на навколишнє середовище, зокрема зниження викидів CO₂ та підвищення ефективності використання природних ресурсів. Зокрема, основний акцент ставиться на зменшення екологічного впливу логістики, оптимізацію транспортних маршрутів і впровадження екологічно чистих технологій. Проблеми впровадження «зеленої логістики» в різних секторах транспортної та логістичної діяльності, зокрема через інтеграцію екологічних рішень, таких як використання альтернативних видів палива, електричних транспортних засобів, оптимізацію транспортних процесів та зменшення викидів CO₂ розкрито в працях [17,22,25,26]. Важливим аспектом є також впровадження цифрових технологій для моніторингу та управління екологічними показниками. Однак, незважаючи на наявність широкого

спектру теоретичних досліджень, питання економічної доцільності та впровадження цифрових технологій залишається недостатньо вивченим.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є аналіз принципів зеленої логістики та визначення напрямів їх реалізації в транспортно-логістичній діяльності підприємств.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розкрити сутність поняття «зелена логістика» та її основні принципи;
- дослідити сучасні тенденції впровадження зеленої логістики у транспортно-логістичній сфері;
- проаналізувати практичні приклади реалізації зелених ініціатив на підприємствах;
- окреслити напрями впровадження принципів зеленої логістики в діяльність транспортно-логістичних підприємств.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У контексті дисбалансу між суспільством і природою, зелена логістика пропонує шляхи адаптації бізнес-процесів, орієнтуючи їх на принципи сталого розвитку. Основними завданнями цієї концепції є зменшення негативного впливу на навколишнє середовище через впровадження інноваційних технологій, які знижують енергоспоживання та використання ресурсів, оптимізують логістичні мережі та покращують процеси утилізації. Зважаючи на актуальність збереження екологічного балансу, впровадження зеленої логістики сприяє досягненню гармонії між економічним розвитком і охороною навколишнього середовища, підтримуючи принципи ефективного природокористування та збереження природних ресурсів. Ця концепція не лише зменшує негативний екологічний вплив, а й орієнтована на підвищення ефективності використання ресурсів та зниження витрат.

На основі систематизації літературних джерел нами встановлено, що визначення категорії «зелена логістика» є неоднозначним в науковій літературі.

Зелена логістика є важливим аспектом сучасного управління логістичними процесами, що орієнтується на інтеграцію екологічних, економічних і соціальних чинників у всі етапи діяльності логістичних систем. Згідно з визначенням Н. Чернописької, зелена логістика охоплює управління впливом на навколишнє середовище та суспільство через зниження інтенсивності використання матеріалів і енергії, зменшення викидів токсичних речовин, а також збільшення рециклінгу ресурсів та максимізацію застосування відновлювальних джерел енергії. Важливим аспектом є подовження терміну використання продукції і підвищення інтенсивності надання логістичних послуг [28].

У свою чергу, Гурч Л. М. і Хмара Л. Є. визначають зелену логістику як комплекс підходів, спрямованих на оптимізацію переміщення матеріальних потоків, включаючи потоки відходів і вторинних ресурсів для переробки, а також на ефективне використання транспортних, природних, фінансових, інформаційних, енергетичних і людських ресурсів. Вони підкреслюють важливість застосування прогресивних технологій у процесах перевезення, що дозволяє створити умови для зниження негативного впливу на екосистему та підвищення ефективності виробництва [17, с. 87].

Ю. Чортюк доповнює це визначення, зазначаючи, що зелена логістика є підсистемою управління потоками продукції з мінімізацією екологічного впливу на навколишнє середовище, що стає особливо актуальним у контексті сучасних вимог до екологічної безпеки [29]. Також, Поручинська І. В. розглядає зелену логістику як науковий напрямок, який охоплює застосування ресурсозберігаючих та екологічно безпечних технологій і процесів з метою збереження довкілля та підтримки сталого розвитку [25, с. 53]. Смирнов І.Г. акцентує увагу на «зеленій логістиці» як програмі створення глобальної транспортно-логістичної системи, яка є безпечною для довкілля. Це визначення відображає прагнення до інтеграції екологічних стандартів у масштабах світового рівня, підкреслюючи важливість глобальних зусиль для збереження довкілля через модернізацію транспортних і логістичних процесів [27].

Лі Янбо і Соньхбян Л. визначають зелену логістику як новий напрямок застосування передових технологій з метою скорочення рівня забруднення та підвищення ефективності логістичних ресурсів. Цей підхід включає інноваційні методи зменшення екологічних відходів та оптимізацію логістичних процесів, таких як впровадження електричних транспортних засобів або використання поновлювальних джерел енергії [6,7].

МакКінон А. та інші науковці визначають зелену логістику як науку, що вивчає вплив на зовнішнє середовище всіх видів логістичної діяльності у ланцюзі постачання, як у прямих, так і у зворотних потоках. Цей підхід зосереджується на системному аналізі екологічних наслідків різних етапів ланцюга постачання, включаючи транспортування, зберігання та переробку продукції [8].

З іншого боку, Роджерс Д. і Тіббен Лембке Р. розглядають зелену логістику як сукупність дій, спрямованих на мінімізацію екологічного впливу логістичної діяльності, що підкреслює важливість практичних рішень для досягнення стійкості. Цей підхід фокусується на конкретних заходах, які можуть бути вжиті на кожному етапі ланцюга постачання, від оптимізації маршрутів до переробки відходів [9-12]. Згідно з Деккером та ін. (2012), зелена логістика є вивченням застосувань, спрямованих на зменшення зовнішніх екологічних впливів, зокрема на викиди парникових газів, шум та нещасні випадки, що виникають під час логістичних операцій, а також на розробку сталого балансу між економічними, соціальними та екологічними цілями [3]. Згідно з цією дефініцією та враховуючи, що слово «зелений» характеризує екологічну стійкість, зелену логістику можна пов'язати зі сталим розвитком. Іншими словами, впровадження стратегій і вимог зеленої логістики допоможе сталому розвитку досягти своїх цілей. Сталий розвиток визначається як «розвиток, який задовольняє потреби сучасності, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти свої потреби», і може стати певним стандартом для зеленої логістики при обговоренні питань, що стосуються охорони природи, соціального та економічного розвитку [31].

З точки зору сталого розвитку, зелена логістика розглядається як виробництво та розподіл продукції сталим способом, враховуючи екологічні та соціальні фактори. Це включає в себе не тільки ефективне управління ресурсами, а й турботу про благополуччя суспільства, забезпечуючи гармонійне поєднання економічних, екологічних і соціальних вимог (рис.1).



Рисунок 1. Ключові цілі «зеленої логістики»

Загалом, зелена логістика є комплексною концепцією, яка орієнтована на інтеграцію екологічних аспектів у всі етапи логістичних процесів. Вона передбачає не лише зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, але й ефективне використання ресурсів та енергозбереження.

Реалізація принципів зеленої логістики в транспортно-логістичній діяльності підприємств потребує впровадження інноваційних технологій і зміни бізнес-парадигм, орієнтуючи підприємства на сталий розвиток.

Основні принципи зеленої логістики:

1. Мінімізація викидів парникових газів — впровадження енергоефективного транспорту та альтернативних видів палива.
2. Раціональне використання ресурсів — скорочення транспортних витрат, оптимізація маршрутів, зменшення споживання енергії.
3. Циркулярна економіка — розвиток зворотної логістики, переробка пакувальних матеріалів.
4. Інтеграція цифрових технологій — використання штучного інтелекту та блокчейн-технологій для моніторингу та аналізу логістичних операцій.

Якщо принципи зеленої логістики закладають основні орієнтири для досягнення екологічної та соціальної відповідальності, то конкретні методи є тими інструментами, які дозволяють здійснити ці принципи на практиці. Зокрема, впровадження інноваційних технологій, таких як системи

управління транспортом (TMS), дозволяє значно оптимізувати маршрути перевезень, зменшити енергоспоживання та скоротити викиди CO₂ (Рис. 2).

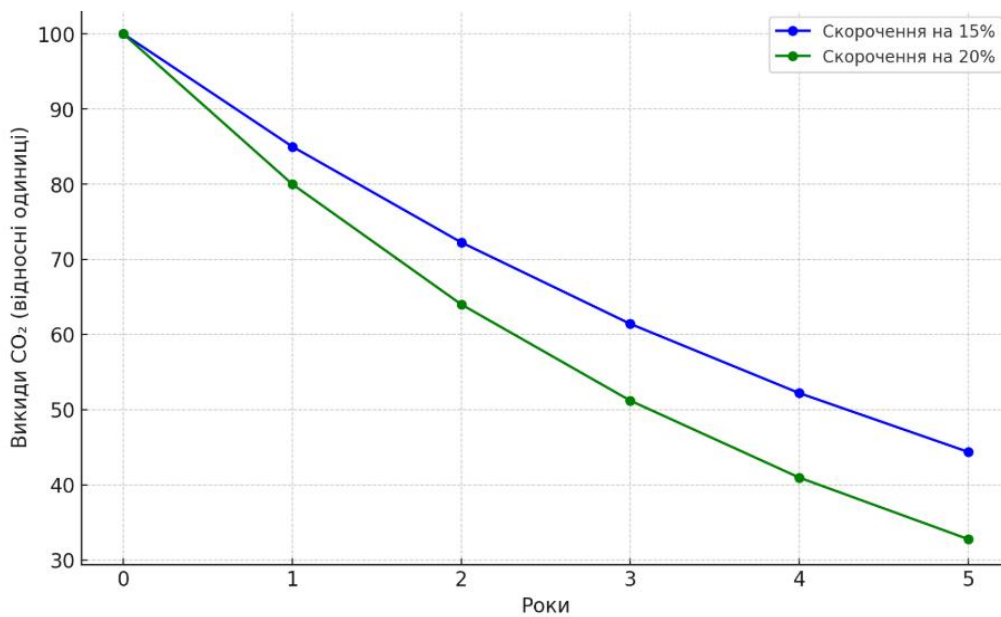


Рисунок 2. Динаміка зниження CO₂ при використанні TMS

Представлені результати скорочення викидів в навколишнє середовище підкреслюють ефективність оптимізації маршрутів для досягнення сталого розвитку та зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Екологічно чисті транспортні технології є важливим елементом зеленої логістики, яка орієнтована на зниження негативного впливу транспортних процесів на навколишнє середовище. Впровадження таких технологій, як електровантажівки, водневі двигуни та біопаливо, показало значний потенціал у зниженні викидів CO₂. Наприклад, програма GoGreen компанії DHL дозволила за 5 років скоротити викиди на 20%, що підкреслює позитивний вплив екологічних рішень на сталий розвиток у логістичному секторі. У компаніях FedEx, Maersk та DHL застосування екологічно чистих технологій дозволяє зменшити викиди CO₂ на 30–40%, що є значним кроком до зниження екологічного сліду від транспортних процесів.

Одним з важливих механізмів досягнення екологічних цілей є впровадження мультимодальних перевезень, які дозволяють значно знизити викиди CO₂. Переведення вантажопотоків на залізничний та водний транспорт дозволяє знизити викиди в 2-3 рази порівняно з автомобільними перевезеннями. Зокрема, компанія Maersk за допомогою мультимодальних рішень змогла скоротити споживання дизельного пального на 25%, що додає ще один позитивний ефект для навколишнього середовища.

Автоматизація складів та впровадження енергоефективних технологій також відіграють важливу роль у зниженні витрат енергії та CO₂. Дослідження показують, що автоматизація дозволяє зменшити енергоспоживання до 30%. Також використання сонячних панелей, інтелектуальних систем клімат-контролю та енергоощадного освітлення значно підвищує енергоефективність складів. Програма «зелений склад» компанії Amazon, яка реалізує ці ініціативи, дозволила знизити викиди CO₂ на 18%.

Циркулярна економіка і концепція зворотної логістики також значно зменшують екологічний вплив логістичних процесів. Відновлення, повторне використання та переробка пакувальних матеріалів дозволяють зменшити витрати на утилізацію до 25%. Наприклад, програма UPS з переробки пакувальних матеріалів дозволила зменшити обсяг відходів на 30%, що ще раз підкреслює важливість екологічних ініціатив у логістичних процесах.

У цілому, впровадження екологічних технологій, мультимодальних перевезень, автоматизації складів та циркулярної економіки є дієвими інструментами для зниження викидів CO₂ та оптимізації витрат в логістичному секторі, що робить його більш сталим та екологічно орієнтованим.

Значну роль у підвищенні ефективності зеленої логістики відіграє цифровізація логістичних процесів. Використання блокчейн-технологій у ланцюгах постачання забезпечує прозорість та

оптимізацію перевезень, що дозволяє скоротити витрати пального на 10–15%. Яскравим прикладом цифровізації логістичних процесів є співпраця **Maersk + IBM**, зокрема створення платформи **TradeLens**. Послідовність логістичних операцій із використання блокчейн-технологій представлено на рисунку 3.



Рисунок 3. Блок-схема процесу використання блокчейну в логістиці на прикладі **TradeLens**

Цей процес дозволяє мінімізувати паперову бюрократію, покращити контроль та підвищити ефективність логістики.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Практика реалізації принципів «зеленої логістики» в діяльності провідних світових компаній показує, що екологічні ініціативи не лише зменшують негативний вплив на навколишнє середовище, але й сприяють зростанню конкурентоспроможності та економічної ефективності. Це демонструє важливість інтеграції сталих практик у бізнес-моделі, де враховуються не лише екологічні, але й економічні вигоди.

Необхідним є запровадження системи екологічного моніторингу, що включає використання сенсорних технологій і цифрових платформ для збору та аналізу даних про викиди, енергоспоживання та екологічні ризики. Впровадження такої системи звітності дозволить компаніям приймати обґрунтовані управлінські рішення, що сприятимуть ефективному контролю за впливом їх діяльності на навколишнє середовище.

Важливим напрямом є розробка мотиваційних механізмів для бізнесу, зокрема податкових пільг та фінансових стимулів для компаній, що інтегрують екологічні технології. Крім того, доцільним є створення грантових програм та інвестиційних фондів для підтримки екологічних ініціатив, що сприятиме залученню бізнесу до сталих інновацій.

Формування партнерських екосистем між транспортними компаніями, державними структурами та науковими установами дозволить створювати інноваційні екологічні рішення. Спільні проекти з використанням електротранспорту та альтернативних видів пального допоможуть зменшити негативний вплив транспортно-логістичних операцій на довкілля. Розвиток партнерських взаємовідносин у зеленій логістиці є основою для забезпечення довготривалої екологічної стійкості галузі.

Впровадження цих заходів дозволить суттєво знизити негативний вплив на довкілля, підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити сталий розвиток логістичної галузі.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було визначено ключові аспекти впровадження принципів зеленої логістики в транспортно-логістичну діяльність підприємств, які можуть значно знизити екологічний вплив та підвищити ефективність логістичних процесів. Ці ініціативи є основою для формування нової парадигми логістики, де сталий розвиток і екологічна відповідальність відіграють ключову роль у побудові бізнес-моделей. Поступовий перехід до більш екологічно чистих технологій, таких як електричні вантажівки або водневі двигуни, дозволяє не лише зменшити викиди

CO₂, але й зробити логістичні процеси більш енергоефективними та менш залежними від традиційних, менш стійких джерел енергії.

У сукупності всі ці заходи підтверджують важливість екологічно орієнтованих технологій у розвитку сталого логістичного сектору. Вони сприяють створенню більш ефективних, енергозберігаючих і соціально відповідальних логістичних систем, що забезпечують зменшення впливу на довкілля та підтримують баланс між економічними, екологічними і соціальними аспектами сталого розвитку.

Перспективним напрямом подальших досліджень є адаптація міжнародного досвіду до умов українського ринку, розробка методики оцінки ефективності екологічних інновацій та визначення економічних переваг від їх застосування.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Autonomous ship project, key facts about Yara Birkeland. Retrieved from <https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland>.
2. Browne, M., & Allen, J. (2008). The impact of urban freight transport: A definition of sustainability from an actor's perspective. *Transportation Planning and Technology*, 31(6), 693-713. <https://doi.org/10.1080/03081060802493247>
3. Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions, and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671-679. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010>
4. DHL. (2020). GoGreen program results. Retrieved from <https://www.dhl.com/ua-en/home/global-forwarding/products-and-solutions/gogreen-solutions.html>
5. GEFCO відправила перший потяг з нейтральним рівнем викидів вуглецю на Новому шовковому шляху. Retrieved from <https://logisticpoint.net/tl/uz/gefco-first-carbon-neutral-block-train>.
6. Li, Y., & Songxia, L. (2008). The forms of ecological logistics and its relationship under the globalization. *Ecological Economy*, 4, 290–298.
7. Li, Y., & Songxian, L. (2018). The forms of ecological logistics and its relationship under the globalization. *Ecological Economy*, 4, 290–298.
8. McKinnon, A. C., Browne, M., Piecyk, M., Whiteing, A. E., & Chartered Institute of Logistics and Transport in the UK. (2015). *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics* (3rd ed.). London: Kogan Page.
9. Rodrigue, J.-P., Slack, B., & Comtois, C. (2021). *Green logistics (the paradoxes of)*. London: Pergamon, 339-350.
10. Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (2008). Going backwards: Reverse logistics trends and practices. Retrieved from <https://www.icesi.edu.co/blogs/gestionresiduossolidos/files/2008/11/libro-lr.pdf>
11. Rogers, D., & Tibben-Lembke, R. (2001). An examination of reverse logistics practices. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 129–145.
12. Rogers, D., & Tibben-Lembke, R. (2021). An examination of reverse logistics practices. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 129–145.
13. Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>
14. Srivastava, S. K. (2007). Green supply chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>
15. Wu, H. J., & Dunn, S. C. (1995). Environmentally responsible logistics systems. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 25, 20-38. <https://doi.org/10.1108/09600039510083925>
16. Величко, О. П. (2022). Логістичне забезпечення сільськогосподарського виробництва великих аграрних компаній. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, 1(56), 118–123.
17. Гурч, Л. М., & Хмара, Л. Є. (2014). Розвиток «зеленої логістики» в Україні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 811, 86–91.
18. Державна служба статистики. Retrieved from <https://ukrstat.gov.ua>.

- 19.Електричні вантажівки Volvo пройшли випробування в екстремальних зимових умовах. Retrieved from <https://www.volvotrucks.com.ua/uk-ua/news/press-releases/2021/dec/Volvos-electric-trucks-tested-in-extreme-winter-weather.html>.
- 20.«Євротермінал» про те, що таке «зелена логістика» і як її застосовувати. Retrieved from <https://www.unn.com.ua/uk/news/1929434-yevroterminal-pro-te-scho-take-zelena-logistika-i-yak-yiyi-zastosovuvati>.
- 21.«Зелена» логістика: теорія та механізми. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/14061392.pdf>.
- 22.Кизим, А., & Кабертай, Д. (2019). Сучасні тренди «зеленої» логістики за умов глобалізації. *Логістика*, 1, 46–49.
- 23.Коломицева, О. В., & Яковенко, В. С. (2022). Моделювання процесів оптимального управління логістичними розподільчими системами. *БізнесІнформ*, 7, 18–21.
- 24.Коніщева, Н. Й., & Трушкіна, Н. В. (2018). Управління логістичною діяльністю промислових підприємств. *Економіка промисловості*, 1(27), 114–123.
- 25.Поручинська, І. В. (2017). Передумови впровадження «зеленої» логістики на автомобільному та залізничному транспорті Волинської області. *Молодий вчений*, 3(43), 53–56.
- 26.Скупейко, В. В., Завальницька, Н. Б., & Струк, Н. Р. (2022). «Зелена» логістика: Понятійний апарат. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Економічні науки»*(1(105), 169-174. <https://doi.org/10.37734/2409-6873-2022-1-21>
- 27.Смирнов, І. Г. «Зелена логістика»: суспільно-географічний аспект // *Науковий вісник Волинського університету ім. Лесі Українки. Географічні науки.* – 2001. – Вип. 2. – Луцьк.
- 28.Сумец, А. М. (2018). *Логістика: Теорія, ситуації, практичні завдання: Навчальна допомога.* Київ: Хай-Тек Пресс.
- 29.Чорнописька, Н. В. (2014). Зелена логістика: Термінологічний аспект. У *Проблеми підготовки професійних кадрів по логістиці в умовах глобальної конкурентної середовища* (pp. 274–276). Київ: Логос.
- 30.Чортюк, Ю. В. (2007). Екологічна стратегія логістичної діяльності торгових підприємств. *Прометей: Регіональний збірник наукових праць з економіки*, 2(23), 226–229.
- 31.Никончук В.М., Гудзинський О.Д. Управління активізацією діяльності аграрних підприємств (теоретико-методологічний аспект): монографія. Київ : Аграр Медіа Груп, 2012. –197 с.

V. Nykonchuk, S.Kozak. Implementation of green logistics principles in the transport and logistics activities of enterprises

The article thoroughly examines the main conceptual approaches to implementing green logistics in transport and logistics processes, with an emphasis on the need to reduce the environmental impact. Key aspects such as reducing greenhouse gas emissions, decreasing energy consumption, and utilizing cutting-edge technologies to achieve efficient management of logistics flows are discussed. Special attention is given to the optimization of transportation routes and the selection of eco-friendly modes of transport, which help lower air pollution levels and reduce environmental strain. At the same time, the article explores various types of transportation based on alternative energy sources, particularly electric and hydrogen vehicles, which are becoming increasingly relevant in the context of climate change and global environmental initiatives.

The article also discusses in detail the economic benefits and challenges for businesses that seek to integrate green technologies into their operations. Companies that transition to sustainable development benefit not only from reduced energy costs but also from enhanced competitiveness in the market due to their environmentally friendly image. However, the authors note certain difficulties, such as the high initial investments that may be required to modernize transport and infrastructure, as well as the underdevelopment of environmental infrastructure in some regions. Given these challenges, the article offers practical recommendations for businesses looking to implement green logistics strategies, particularly regarding the adoption of innovative solutions in transportation, storage, and freight handling. Additionally, the importance of developing infrastructure for eco-friendly vehicles and increasing public awareness about the significance of sustainable development in the logistics sector is emphasized.

Keywords: green logistics, environmental sustainability, principles of green logistics, transport and logistics system, ecological technologies, logistics digitalization

НИКОНЧУК Вікторія Миколаївна, доктор економічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування, e-mail: v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7515-6016>

КОЗАК Світлана Володимирівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національний університет водного господарства та природокористування e-mail: svetakoza1971@ukr.net. <http://orcid.org/0009-0006-3204-1861>

Viktoriia NYKONCHUK, D. Sc (Economics), Professor, Head of the Transport Technologies and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7515-6016>;

Svitlana KOZAK, D. Sc (Economics), Associate Professor of the Department of Transport Technologies and Technical Service Department, National University of Water and Environmental Engineering, svetakoza1971@ukr.net. <http://orcid.org/0009-0006-3204-1861> DOI 10.36910/automash.v2i21.1215

DOI 10.36910/automash.v1i24.1738

**ДО ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ АВТОМОБІЛЯ КАТЕГОРІЇ М1 З ПРИЧЕПОМ КАТЕГОРІЇ
О2 У ГАЛЬМІВНОМУ РЕЖИМІ**

Безпечний рух автомобіля і автопоїзда багато в чому визначається його динамічними властивостями і, у значній мірі гальмівними властивостями, які суттєво залежать від завантаженості причепа і розташуванні вантажу в його кузові. Так, несиметричне завантаження причепа призводить до зміни навантажень як на колеса однієї осі, так і одного борту. У роботі ефективність гальмівної системи автопоїзда була оцінена за величиною гальмівного шляху S_t при заданій початковій швидкості V_0 та/або середнім значенням уповільнення j_x , а також показником η_{γ} стійкості. Ці показники визначені для автопоїзда у складі тягового автомобіля Mercedes-Benz T1N "Sprinter" і двовісного причепа ПВБФ 15. Аналіз розрахунків показав, що тільки за коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на осях причепа $k_n = 0,82$ автопоїзд відповідає вимогам нормативних документів ($V_0 = 60$ км/год, $j_{ap} = 6,0$ м/с²). При цьому встановлено, що автопоїзд втрачає стійкість із-за нестійкості тягового автомобіля за коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на його колесах на рівні 0,7. У той же час причіп залишається стійким майже у всьому діапазоні нерівномірності гальмівних зусиль від 0,53 до 1,0, тобто обмежуючим фактором при гальмуванні автопоїзда за стійкістю руху є тяговий автомобіль.

На показники ефективності гальмування автопоїзда суттєво впливають завантаженість причепа і висота його центру мас. Встановлено, що найгірші показники стійкості притаманні автопоїзду з причепом без вантажу. При цьому збільшення завантаженості причепа призводить до збільшення коефіцієнта його стійкості а за різних значень коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на колесах його осей.

Показано на суттєву залежність коефіцієнта стійкості причепа від висоти його центру мас. Так, якщо за відносної висоти центру мас причепа в межах 0,2..0,35 коефіцієнт стійкості незалежно від коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на його осях наближається до 1,0, то цей ефект втрачається по мірі подальшого підвищення висоти центру мас причепа і за відносної її значення $k_{np} = 0,5$ коефіцієнт стійкості автопоїзда майже у двічі зменшується.

Ключові слова: автопоїзд, причіп, гальмування, коефіцієнт нерівномірності, коефіцієнт стійкості, шлях гальмування, уповільнення, стійкість.

ВСТУП

Ефективність використання рухомого складу автомобільного транспорту і його продуктивність залежать, як відомо, від вантажопідйомності і середньої швидкості руху, а також сукупності техніко-експлуатаційних властивостей, які виявляються в процесі експлуатації і зумовлюють придатність рухомого складу до застосування в заданих експлуатаційних умовах.

Тим часом продуктивність, особливо автопоїздів, істотно залежить від їх рухливості. Підвищення рухливості досягається підвищенням швидкості руху і рядом інших додаткових властивостей, а саме тягово-швидкісних і гальмівних.

Сучасний стан розвитку рухомого складу автомобільного транспорту характеризується різноманіттям типів і видів автомобілів, причепів і напівпричепів. Нарівні з найбільш поширеними двовісними автомобілями з передніми керованими колесами отримують все більший розвиток нові конструкції з іншими компоновальними схемами і системами управління. Очевидно, що новим транспортним машинам притаманні свої характерні особливості і поява їх диктує необхідність придання цим машинам певних якостей взагалі і, зокрема, тих, що відповідають за безпеку руху.

Безпечний рух автомобіля і автопоїзда багато в чому визначається його динамічними властивостями і, у значній мірі гальмівними властивостями, маневреністю, стійкістю і керованістю. У залежності від умов експлуатації (транспортних і дорожніх) на перший план виходять різні параметри. Так, для автопоїздів з причепами категорії О1 і О2, що експлуатуються приватними підприємцями і аматорами, важливим є забезпечення стійкості руху в процесі гальмуванні автопоїзда, зокрема при несиметричному завантаженні причепа, що призводить до зміни навантажень як на колеса однієї осі, так і одного борту. Це обумовлює актуальність дослідження.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проведеними раніше дослідженнями встановлено, що практично всі параметри автомобіля і причіпних ланок впливають на керованість і стійкість руху автопоїзда. Цей вплив пов'язаний з геометричними параметрами й положенням центру мас автомобіля, характеристиками шин, числом осей і розміщенням їх по базі, прийнятою схемою системи управління автопоїзда [1].

Характер руху автопоїзда принципово відрізняється від руху одиничного автомобіля. Відмінність можна пояснити наявністю додаткових зусиль, що виникають у шарнірному з'єднанні ланок транспортного засобу, а також сил і моментів, які діють на його окремі ланки та рух транспортного засобу в цілому. Особливо помітним є їх вплив при гальмуванні автопоїзда, яке може супроводжуватися складанням ланок та втратою стійкості транспортного засобу [2]. Це пояснюється тим, що у процесі гальмування на автомобіль діють сили та моменти в різних площинах та напрямках. Під їх впливом змінюється навантаження окремих коліс. Вплив бічних сил призводять до перевантаження коліс одного борту транспортного засобу, а також може спричинити відведення або ковзання його коліс. Це може призвести до появи обертового моменту у горизонтальній площині.. Поява такого моменту може спричинити занос транспортного засобу, а при гальмуванні автопоїзда – складання його ланок [2-5 та ін.]. Це обумовило, що в якості критеріїв стійкості руху автомобілів та автопоїздів у різних режимах руху використовують кутові та лінійні відхилення транспортних засобів від заданої траєкторії руху; бічні відхилення траєкторії причіпної ланки від траєкторії автомобіля-тягача, максимальне значення яких не повинно перевищувати $\pm 3\% B_r$ (B_r – габаритна ширина ланки); кут складання автопоїзда. Крім того, ще одним показником стійкості автопоїзда у гальмівному режимі може бути обрано значення граничної швидкості, з якою автомобіль може рухатися в заданих умовах.

Окрім згаданих факторів, не менш вагомим на стійкість автопоїзда у гальмівному режимі є вплив бортової нерівномірності гальмівних сил. Нерівномірність може виникнути внаслідок порушень регулювання гальмівних механізмів або через вплив зовнішніх факторів (потрапляння вологи, пилу, бруду на робочі поверхні гальмівних механізмів; дефекти у виготовленні гальмівних накладок та ін.). У роботах [6 -12] автори акцентують увагу на негативному впливі бортової нерівномірності гальмівних сил на стійкість автомобіля через появу обертового моменту в горизонтальній площині. Автори роботи [11] стверджують, що обертовий момент, спричинений бортовою нерівномірністю гальмівних сил, призводить до бокового відхилення автомобіля навіть при незаблокованих колесах будь-якої осі. На думку дослідників, небезпечною є втрата стійкості автомобіля при гальмуванні без блокування коліс через виникнення бічного відведення транспортного засобу, спричиненого бортовою нерівномірністю гальмівних сил. Науковці стверджують, що в даному випадку навіть антиблокувальна система не в змозі запобігти боковому зміщенню автомобіля та зміні його курсового кута.

В процесі експлуатації автопоїздів особливо небезпечними є екстрені гальмування, оскільки вони, в більшості випадків, супроводжуються блокуванням коліс. В роботах [10-12] доведено, що навіть для одиничних автомобілів при гальмуванні із заблокованими задніми колесами нерівномірність на передній осі не допустима, оскільки вона спричиняє занос транспортного засобу. Автори роботи [13] стверджують про небезпечність з точки зору стійкості екстреного гальмування транспортного засобу з бортовою нерівномірністю гальмівних сил. Дослідники наголошують, що зі збільшенням початкової швидкості гальмування та нерівномірності дії гальмівних механізмів коліс однойменних осей автомобілів та автопоїздів, значно зростають величина гальмівного шляху, а також поперечні та кутові відхилення транспортних засобів.

Проведений аналіз дозволив з'ясувати, що проблема стійкості руху автомобільних поїздів у гальмівному режимі досліджена достатньо повно. Проте, меншою мірою досліджені питання стійкості гальмування автопоїзда з урахуванням розподілу гальмівних сил по осях та бортах автопоїзда та розташування вантажу в кузові причепа. Особливої уваги потребує вивчення спільного впливу даних факторів.

Згідно із нормативним документом [14] основними критеріями стійкості та ефективності гальмування транспортних засобів є: лінійне відхилення від коридору руху, шириною 3,5 м; загальна питома гальмівна сила γ_z ; коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил осей; тривалість спрацювання гальмівної системи; усталене сповільнення $j_{\text{уст}}$; гальмівний шлях S_z ; початкова швидкість гальмування V_0 . На визначення цих показників і спрямована робота.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження впливу конструктивних і експлуатаційних факторів на показники стійкості автомобіля з причепом категорії O2 у гальмівному режимі

Для досягнення мети дослідження в роботі вирішуються наступні задачі:

– визначення нормальних реакцій опірної поверхні на осі і колеса тягового автомобіля і причепа;

– визначення оціночних показників ефективності гальмування автомобіля з причепами категорій O1 і O2;

–вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на показники ефективності гальмування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Будемо оцінювати ефективність гальмівної системи автопоїзда за величиною гальмівного шляху S_{Γ} при заданій початковій швидкості V_0 та/або середнім значенням уповільнення j_x в ході випробувань, а також показником η_{yi} стійкості, що є відношенням необхідної для гальмування ширини проїжджої частини до мінімально допустимої за умовами безпеки руху [15]

Для автопоїздів у складі тягового автомобіля категорії М1 і двовісного причепа категорії О2 при випробуваннях типу «0» з від'єднаним двигуном нормативи ефективності становлять: $V_0=60$ км/год і $j_x = 6,0$ м/с², причому ця ефективність повинна досягатися за умови, що автопоїзд залишається у смузі руху шириною $B_d = 3,5$ м за курсового кута $\gamma \leq 15^\circ$, а задні колеса автомобіля не повинні блокуватися раніше передніх коліс при коефіцієнті гальмування $k_{\Gamma} = j_x/g$ від 0,15 до 0,8 [15]. У цій же роботі показники ефективності гальмування визначені як

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{yai} = 1 - \frac{2|y_a + a_e(b_e) \sin \gamma_a|}{|B_d - B_{ae}|} \\ \eta_{yni} = 1 - \frac{2|y_n - d_e \sin \gamma_n|}{|B_d - B_{ne}|} \\ \eta_{yan} = \text{Min}(\eta_{yai}, \eta_{yn}), \end{array} \right. \quad (1)$$

де B_{ag}, B_{pr} - габаритна ширина ланок; a_r, b_r, d_r - відстані від центрів мас до крайніх точок кузова тягового автомобіля і причепа; y_a, y_n - зміщення траєкторії центру мас автомобіля і причепа; γ_a, γ_n - курсові кути автомобіля і причепа.

Аналіз окремих рівнянь системи (2) показав, що показник стійкості може приймати як позитивні, і негативні значення, причому позитивні значення η_y обумовлюють область стійкого, а негативні — нестійкого руху [15].

Порушення стійкості автопоїзда при гальмуванні може бути викликано появою повертаючих моментів M_{ni} , що виникають внаслідок неоднакової ефективності дії гальмівних механізмів на колесах однойменних осей, яка характеризується коефіцієнтами початкової нерівномірності k_{ni} . Назвемо колесо з більшою ефективністю гальмування "відстаючим", а з меншою - "забігаючим". Тоді

$$k_{ni} = 1 - R_{x3} / R_{xo} \quad (2)$$

де R_{x3}, R_{xo} — дотичні реакції на «забігаючому» і «відстаючому» колесах.

Дотичні реакції на колесах осей автопоїзда визначаються як

$$R_{xi} = Z_i \times \varphi_i, \quad (3)$$

де Z_i — нормальна реакція опірної поверхні на колесо i -ої осі;

φ_i — коефіцієнт зчеплення i -ого колеса з опірною поверхнею.

Подальші розрахунки виконаємо для автопоїзда у складі тягового автомобіля Mercedes-Benz T1N "Sprinter" і двовісного причепа ПВБФ 15 [16].

Визначимо уповільнення і гальмівний шлях автопоїзда за нерівномірності гальмівних сил на осях причепа. Прийнемо навантаження на осі автопоїзда з роботи [16], а навантаження на колеса одного борту визначимо, поділивши навантаження на вісь на два колеса.

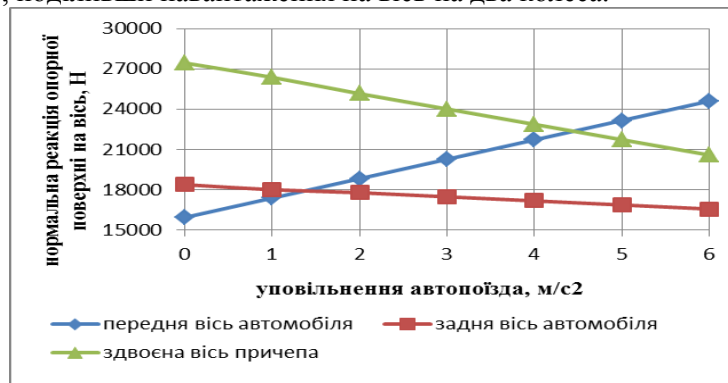


Рисунок 1 – Зміна навантаження на осі автопоїзда у функції уповільнення [16]

Тоді вважаючи, що нерівномірність гальмівних сил на колесах однієї осі обумовлена зміною навантаження на кожне колесо, отримаємо

$$P_{ап} = 0,5G_n \times \varphi + 0,5G_n K_{нп} \times \varphi = 0,5G_n \times \varphi(1 + K_{нп}), \quad (4)$$

$$P_{зап} = G_a \times \varphi + 0,5G_n \times \varphi(1 + K_{нп}) \quad (5)$$

де G_n - навантаження на здвоєну вісь причепа;

G_a - навантаження на осі автомобіля.

$K_{нп}$ - коефіцієнт нерівномірності гальмівних сил на осі причепа.

Прирівнюючи гальмівні сили причепа і автопоїзда отримаємо

$$j_n = \frac{g \times \varphi(1 + K_{нп})}{2}, \quad j_{ап} = \frac{G_a \times g \times \varphi(1 + K_{нп})}{G_a + G_n} \quad (6)$$

Гальмівний шлях автопоїзда визначиться як

$$S_{зап} = \frac{G_{ап} \times v^2}{2 \times g \times P_{зап}} = \frac{v^2}{2 \times j_{ап}} \quad (7)$$

Результати розрахунків уповільнення і шляху гальмування представимо на рис.2,3.

Аналіз розрахунків, рис. 2, показує, що тільки за коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на осях причепа $k_n = 0,82$ автопоїзд відповідає вимогам нормативних документів ($V_0 = 60$ км/год, $j_{ап} = 6,0$ м/с²). Разом з тим, за величиною гальмівного шляху навіть за коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на осях причепа $k_n = 0,5$ автопоїзд відповідає вимогам нормативних документів ($V_0 = 60$ км/год, $S_T = 33,9$ м). Із цього слідує, що для забезпечення вимог нормативних документів щодо ефективності гальмування автопоїзда нерівномірність гальмівних сил на осях причепа не повинна перевищувати $k_n = 0,82$.

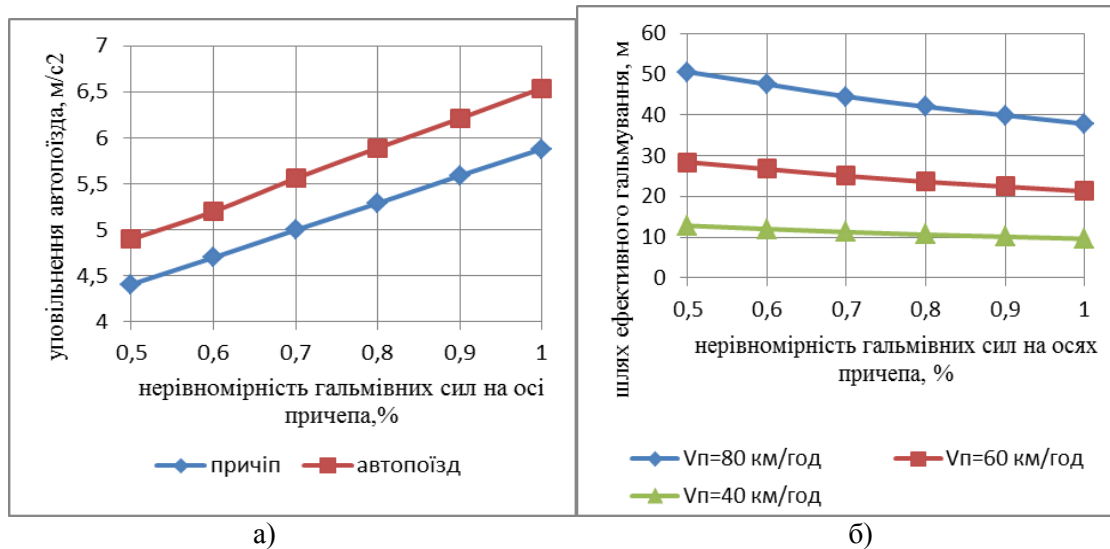


Рисунок 2 – Зміна уповільнення причепа і автопоїзда (а) і гальмівного шляху автопоїзда (б) в залежності від нерівномірності гальмівних сил на осях причепа

Стійкість автопоїзда будемо оцінювати коефіцієнтами ефективності гальмування (1), для визначення яких необхідно знати зміщення траєкторії автомобіля і причепа (відносно прямолінійного руху автопоїзда), а також їх курсового кута в процесі гальмування. Ці параметри були отримані шляхом розв'язку системи диференціальних рівнянь руху автопоїзда в режимі гальмування [17 (1)], рис. 3,4.

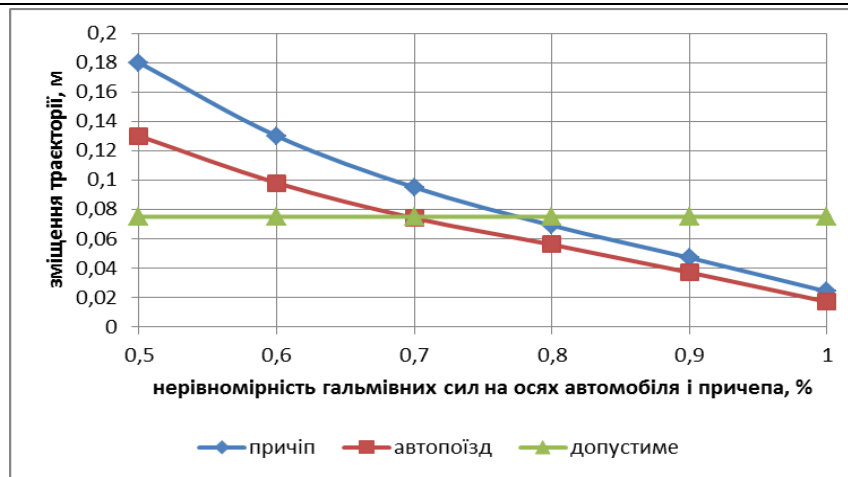


Рисунок 3 – Зміщення траєкторії автомобіля і причепа від коефіцієнта нерівномірності гальмування

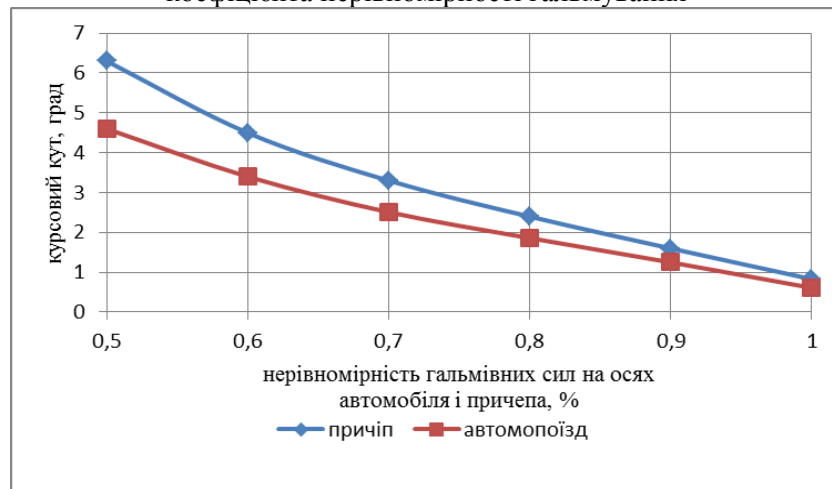


Рисунок 4 – Зміщення курсового кута автомобіля і причепа від коефіцієнта нерівномірності гальмування

Ці параметри були використані для визначення коефіцієнта стійкості автомобіля, причепа і автопоїзда в гальмівному режимі в залежності від нерівномірності гальмівних сил на осях автомобіля і причепа, рис. 5. Як слідує з наведеного рисунка, автопоїзд втрачає стійкість із-за нестійкості тягового автомобіля за коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на його колесах на рівні 0,7. У той же час причіп залишається стійким майже у всьому діапазоні нерівномірності гальмівних зусиль від 0,53 до 1,0, тобто обмежуючим фактором при гальмуванні автопоїзда за стійкістю руху є тяговий автомобіль.

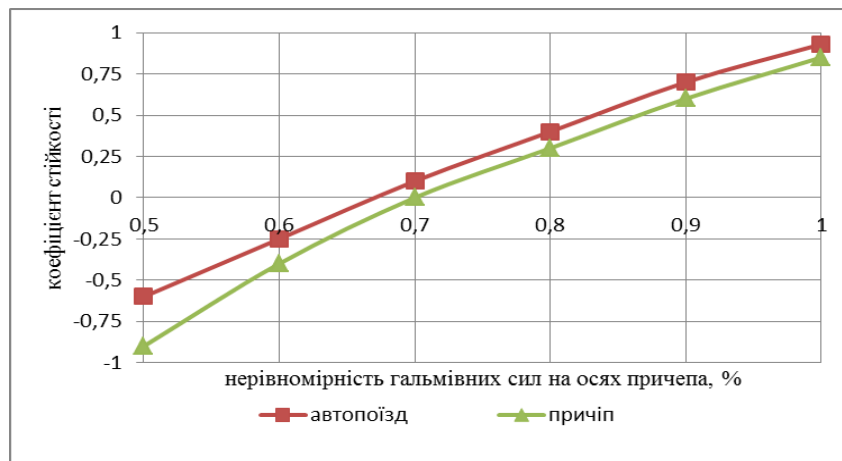


Рисунок 5 – Зміна коефіцієнта стійкості автомобіля, причепа і автопоїзда в залежності від коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на осях

Розглянемо у подальшому вплив конструктивних параметрів причепа на стійкість автопоїзда в процесі гальмування. Змінювати будемо такі параметри:

- завантаженість в межах від 0 до 2800 кг,
- відносну висоту центру мас в межах від 0,2 до 0,5.

Результати розрахунків наведені на рис. 6,7.

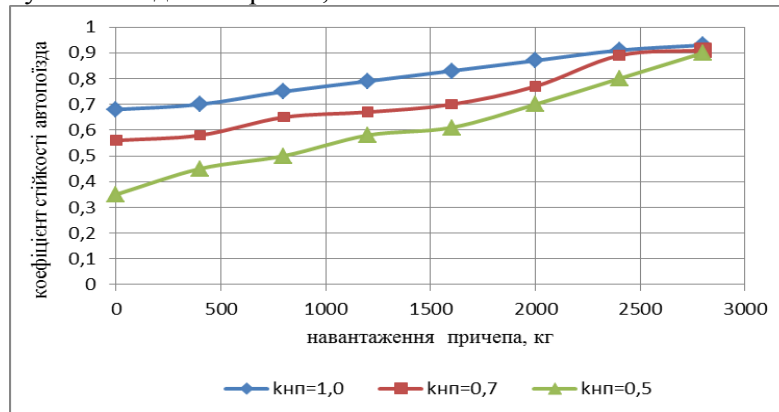


Рисунок 6 – Зміна коефіцієнта стійкості автопоїзда від завантаженості причепа

Як слідує з даних рис. 6, збільшення завантаженості причепа призводить до збільшення коефіцієнта стійкості причепа за різних значень коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на колесах його осей. Це свідчить про те, що найгірші показники стійкості притаманні автопоїзду з причепом без вантажу. Це необхідно враховувати при експлуатації автопоїзда.

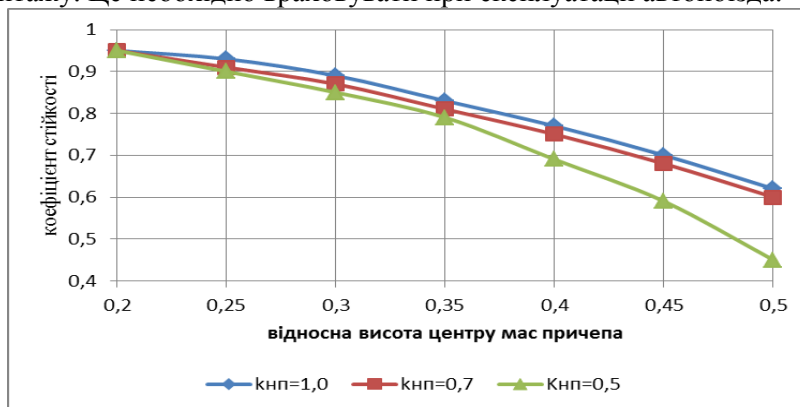


Рисунок 7 – Зміна коефіцієнта стійкості автопоїзда від відносної висоти центру мас причепа

Аналіз даних, рис. 7, показує на суттєву залежність коефіцієнта стійкості причепа від висоти його центру мас. Так, якщо за відносної висоти центру мас причепа в межах 0,2 коефіцієнт стійкості незалежно від коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на його осях наближається до 1,0, тобто стійкість такого причепа повністю забезпечується. Поряд з цим, важливо відмітити ще два такі фактори. Перший полягає в тому, що за відносної висоти центру мас в межах 0,2...0,35 коефіцієнт стійкості автопоїзда майже не залежить від нерівномірності гальмівних сил на його колесах. Пояснюється це тим, що за незначної висоти центру мас довантаження і розвантаження коліс бортів є несуттєвим, внаслідок чого зменшуються зміщення траєкторії причепа і курсовий кут, що призводить до підвищення коефіцієнта стійкості. Цей ефект втрачається по мірі подальшого підвищення висоти центру мас причепа і за відносної її значення $k_{np}=0,5$ коефіцієнт стійкості автопоїзда майже у двічі зменшується.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Безпечний рух автомобіля і автопоїзда багато в чому визначається його динамічними властивостями і, у значній мірі гальмівними властивостями, які суттєво залежать від завантаженості причепа і розташуванні вантажу в його кузові. Так, несиметричне завантаження причепа призводить до зміни навантажень як на колеса однієї осі, так і одного борту. У роботі ефективність гальмівної системи автопоїзда була оцінена за величиною гальмівного шляху S_t при заданій початковій швидкості V_0 та/або середнім значенням уповільнення j_x , а також показником η_{yi} стійкості. Ці показники визначені для автопоїзда у складі тягового автомобіля Mercedes-Benz T1N "Sprinter" і

двовісного причепа ПВБФ 15. Аналіз розрахунків показав, що тільки за коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на осях причепа $k_n = 0,82$ автопоїзд відповідає вимогам нормативних документів ($V_0 = 60$ км/год, $j_{ap} = 6,0$ м/с²). При цьому встановлено, що автопоїзд втрачає стійкість із-за нестійкості тягового автомобіля за коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на його колесах на рівні 0,7. У той же час причіп залишається стійким майже у всьому діапазоні нерівномірності гальмівних зусиль від 0,53 до 1,0, тобто обмежуючим фактором при гальмуванні автопоїзда за стійкістю руху є тяговий автомобіль.

На показники ефективності гальмування автопоїзда суттєво впливають завантаженість причепа і висота його центру мас. Встановлено, що найгірші показники стійкості притаманні автопоїзду з причепом без вантажу. Це необхідно враховувати при експлуатації автопоїзда. Поряд із завантаженістю коефіцієнт стійкості причепа суттєво залежить від висоти його центру мас. Так, за відносної висоти центру мас в межах 0,2...0,35 коефіцієнт стійкості автопоїзда майже не залежить від нерівномірності гальмівних сил на його колесах. Цей ефект втрачається по мірі подальшого підвищення висоти центру мас причепа і за відносної її значення $k_{np} = 0,5$ коефіцієнт стійкості автопоїзда майже у двічі зменшується, що необхідно враховувати при експлуатації автопоїзда.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що ефективність гальмівної системи автопоїзда слід оцінювати за величиною гальмівного шляху S_g при заданій початковій швидкості, уповільнення j_x , а також показником η_{st} стійкості, що є відношенням необхідної для гальмування ширини проїжджої частини до мінімально допустимої за умовами безпеки руху.

2. Встановлено, що тільки за коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на осях причепа $k_n = 0,82$ автопоїзд відповідає вимогам нормативних документів щодо уповільнення і шляху ефективного гальмування.

3. Встановлено, що автопоїзд втрачає стійкість із-за нестійкості тягового автомобіля за коефіцієнта нерівномірності гальмівних зусиль на його колесах на рівні 0,7. У той же час причіп залишається стійким майже у всьому діапазоні нерівномірності гальмівних зусиль від 0,53 до 1,0, тобто обмежуючим фактором при гальмуванні автопоїзда за стійкістю руху є тяговий автомобіль.

4. Показано, що збільшення завантаженості причепа призводить до збільшення коефіцієнта його стійкості а за різних значень коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на колесах його осей. Це свідчить про те, що найгірші показники стійкості притаманні автопоїзду з причепом без вантажу. Це необхідно враховувати при експлуатації автопоїзда.

5. Показано на суттєву залежність коефіцієнта стійкості причепа від висоти його центру мас. Так, якщо за відносної висоти центру мас причепа в межах 0,2...0,35 коефіцієнт стійкості незалежно від коефіцієнта нерівномірності гальмівних сил на його осях наближається до 1,0, то цей ефект втрачається по мірі подальшого підвищення висоти центру мас причепа і за відносної її значення $k_{np} = 0,5$ коефіцієнт стійкості автопоїзда майже у двічі зменшується.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Прогній П. Б. До аналізу процесу гальмування сидельного автопоїзда без блокування коліс / П. Б. Прогній // *Вісник Національного транспортного університету*. – 2014. – Вип. 29. – С. 18–25.
- 2.Сахно В. П., Поляков В. М., Яценко Д. М., Попелиш Д. М. До питання щодо гальмування шарнірно-зчленованих автобусів // *Автошляховик України*. – 2021. – № 2. – С. 10–17.
- 3.Marchuk R., Marchuk N., Sakhno V., Poliakov V. *Braking performance of articulated road trains* // *Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. – 2021. – Vol. 91, No. 1. – P. 63–79. doi: 10.14669/AM.VOL91.ART5
- 4.Поляков В. М., Приходченко Д. Ю., Абрамов Д. А. Теоретичне дослідження впливу осьової нерівномірності гальмівних сил на стійкість автопоїзда // *Вісник СНУ імені Володимира Даля*. – 2007. – № 6 (112). – С. 59–62.
- 5.Подригало М. А., Коробко А. І. Вплив бортової нерівномірності гальмівних сил на відхилення автомобіля // *Автомобільний транспорт: зб. наук. праць*. – Харків : ХНАДУ, 2009. – № 24. – С. 33–36.
- 6.Кузнецов Р. М. *Покращання показників стійкості тріланкових автопоїздів у граничних режимах руху* : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.02. – Київ : НТУ, 2007. – 176 с.
- 7.Кузнецов Р. М., Данилюк Р. Л. До питання стійкості сидельно-причіпного автопоїзда у гальмівному режимі // *Наукові нотатки: міжвузівський збірник*. – Луцьк : Вид-во ЛНТУ, 2011. – Вип. 32. – С. 197–199.

8.Кузнецов Р. М., Лотиш В. В., Мурований І. С., Онищук В. П. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху триланкового причіпного автопоїзда // *Вісник СХУ імені Володимира Даля*. – 2008. – № 7 (125). – С. 84–87.

9.Сахно В. П., Поляков В. М., Стельмашук В. В., Попелиш Д. М. До визначення стійкості руху триланкового причіпного автопоїзда у гальмівному режимі // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. – 2022. – № 1 (18). – С. 143–154. ISSN 2313-5425.

10.Поляков В. М., Приходченко Д. Ю., Шарай С. М. Вплив експлуатаційних факторів на стійкість руху триланкового автопоїзда при гальмуванні // *Вісник Севастопольського національного технічного університету* : зб. наук. пр. – Севастополь : СевНТУ, 2011. – Вип. 121. – С. 61–64.

11.Сахно В. П., Кузнецов Р. М., Марчук Р. М., Онищук В. П. До визначення показників стійкості автопоїзда-контейнеровоза // *Проблеми автомобільного транспорту: зб. наук. праць*. – Київ : НТУ, 2011. – Вип. 8. – С. 157–165.

12.ДСТУ UN/ECE R 13-09:2004. Єдині технічні приписи щодо офіційного схвалення типу транспортних засобів категорій М, N та О стосовно гальмування : Правила ЄЕК ООН № 13. – Женева : UNECE, 2008. – 276 с.

13.Zhelezov E. I., Porotikov A. I., Zhelezov R. E. *Evaluation of braking properties of a light-duty road train* // *Young Scientist*. – 2017. – No 15 (149). – P. 51–56.

14.Сахно В. П., Мурований І. С., Онищук В. П., Стельмашук С. В., Вінцюк М. Я. До визначення стійкості руху автомобіля з причепом категорії О2 у гальмівному режимі // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. – 2024. – С. 296–306.

15.Сахно В. П., Онищук В. П., Стельмашук С. В. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху автомобіля з причепом категорії О2 у гальмівному режимі // *Автошляховик України*. – 2024. – № 2 (279). – С. 74–85.

REFERENCES

1.Prohnii, P. B. (2014). Do analizu protsesu halmuvannia sidel'noho avtopoizda bez blokuvannia kolis [On the analysis of the braking process of a semi-trailer road train without wheel lock-up]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu*, (29), 18–25.

2.Sakhno, V. P., Poliakov, V. M., Yashchenko, D. M., & Popelysh, D. M. (2021). Do pytannia shchodo halmuvannia sharnirno-zhelenovanykh avtobusiv [On the braking of articulated buses]. *Avtoshliakhovik Ukrainy*, (2), 10–17.

3.Marchuk, R., Marchuk, N., Sakhno, V., & Poliakov, V. (2021). Braking performance of articulated road trains. *Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 91(1), 63–79. <https://doi.org/10.14669/AM.VOL91.ART5>

4.Poliakov, V. M., Prykhodchenko, D. Yu., & Abramov, D. A. (2007). Teoretychne doslidzhennia vplyvu os'ovoї nerivnomirnosti halmivnykh syl na stiikist' avtopoizda [Theoretical study of the effect of axial brake-force non-uniformity on road-train stability]. *Visnyk SNU imeni Volodymyra Dalia*, (6 [112]), 59–62.

5.Podryhalo, M. A., & Korobko, A. I. (2009). Vplyv bortovoi nerivnomirnosti halmivnykh syl na vidkhylenia avtomobilia [Influence of lateral brake-force imbalance on vehicle deviation]. *Avtomobil'nyi transport*, (24), 33–36.

6.Kuznetsov, R. M. (2007). *Pokrashchannia pokaznykiv stiikosti trylankovykh avtopoizdiv u hranchnykh rezhymakh rukhu* [Improving stability performance of three-link road trains in critical driving modes] (Candidate's thesis). National Transport University, Kyiv, Ukraine.

7.Kuznetsov, R. M., & Danyliuk, R. L. (2011). Do pytannia stiikosti sidel'no-prychipnoho avtopoizda u halmivnomu rezhymy [On the stability of a tractor-semitrailer road train during braking]. *Naukovi notatky*, 32, 197–199.

8.Kuznetsov, R. M., Lotysh, V. V., Murovanyi, I. S., & Onyshchuk, V. P. (2008). Vplyv konstruktyvnykh i ekspluatatsiinykh faktoriv na stiikist' rukhu trylankovoho prychipnoho avtopoizda [Influence of design and operational factors on the stability of a three-link trailer road train]. *Visnyk SNU imeni Volodymyra Dalia*, (7 [125]), 84–87.

9.Sakhno, V. P., Poliakov, V. M., Stelmashchuk, V. V., & Popelysh, D. M. (2022). Do vyznachennia stiikosti rukhu trylankovoho prychipnoho avtopoizda u halmivnomu rezhymy [Determining the stability of a three-link trailer road train in the braking mode]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(18), 143–154.

10.Poliakov, V. M., Prykhodchenko, D. Yu., & Sharai, S. M. (2011). Vplyv ekspluatatsiinykh faktoriv na stiikist' rukhu trylankovoho avtopoizda pry halmuvanni [Effect of operational factors on the stability of a three-link road train during braking]. *Visnyk Sevastopols'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*, 121, 61–64.

11.Sakhno, V. P., Kuznetsov, R. M., Marchuk, R. M., & Onyshchuk, V. P. (2011). Do vyznachennia pokaznykiv stiihosti avtopoizda-konteinerovoza [On determining stability indicators of a container road train]. *Problemy avtomobil'noho transportu*, 8, 157–165.

12.United Nations Economic Commission for Europe. (2008). *UN/ECE Regulation No. 13-09: Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking* (DSTU UN/ECE R 13-09:2004). Geneva, Switzerland: UNECE.

13.Zheleznov, E. I., Porotikov, A. I., & Zheleznov, R. E. (2017). Evaluation of braking properties of a light-duty road train. *Young Scientist*, 15(149), 51–56.

14.Sakhno, V. P., Murovanyi, I. S., Onyshchuk, V. P., Stelmashchuk, S. V., & Vintsyuk, M. Ya. (2024). Do vyznachennia stiihosti rukhu avtomobilia z pryhypom katehorii O2 u halmivnomu rezhymi [Determining the stability of an M1–O2 car-trailer combination during braking]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*, (2), 296–306.

15.Sakhno, V. P., Onyshchuk, V. P., & Stelmashchuk, S. V. (2024). Vplyv konstruktyvnykh i ekspluatatsiynykh faktoriv na stiihost' rukhu avtomobilia z pryhypom katehorii O2 u halmivnomu rezhymi [Influence of design and operational factors on the stability of an M1–O2 car-trailer combination during braking]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, (2 [279]), 74–85.

Onyshchuk V.P., Stelmashchuk S.V., Skochylias A.Yu. On Determining the Stability of an M1-Category Vehicle with an O2-Category Trailer During Braking

The paper investigates the braking stability of an M1–O2 road train composed of a light commercial van (Mercedes-Benz T1N Sprinter) towing a dual-axle trailer (ПВБФ 15). Particular attention is paid to how the simultaneous action of axle-side brake-force non-uniformity, trailer payload and the vertical position of the combined centre of gravity (CoG) affects both deceleration efficiency and directional safety. A coupled, non-linear six-degree-of-freedom model of the articulated combination was solved numerically; the brake forces on each wheel were varied parametrically so that the imbalance coefficient $k_{\square}$ covered the range 0.50–1.00. Three performance criteria were adopted: braking distance S_b , mean deceleration j_x and the stability coefficient η_{yi} , defined as the ratio of the lane width required for stable braking to the statutory limit.

The simulation demonstrates that the UNECE R-13 requirement of $j \geq 6 \text{ m s}^{-2}$ at an initial speed of 60 km h^{-1} is met only when the trailer-axle imbalance does not exceed $k_{\square} = 0.82$. Global loss of stability is governed by the towing vehicle: it becomes laterally unstable at $k_{\square} \approx 0.70$, whereas the trailer retains stability down to $k_{\square} = 0.53$. Raising the trailer payload from 0.6 t to 2.8 t improves η_{yi} by 12–18 %, while increasing the relative CoG height from 0.35 to 0.50 halves stability.

Scientific novelty lies in the integrated assessment of simultaneous axle-side brake-force imbalance and mass-distribution parameters, which yields a more realistic forecast of road-train behaviour in emergency braking. The practical value consists in formulating admissible imbalance limits and cargo-placement guidelines that can be incorporated into maintenance regulations, driver-assist warnings and onboard monitoring algorithms.

Keywords: road train; braking stability; brake-force imbalance; directional stability; centre of gravity; payload distribution; mathematical modelling.

ОНИЩУК Василь Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: V.Onyshchuk@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>

СТЕЛЬМАЩУК Станіслав Валерійович, аспірант третього року навчання кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, stanislav0077@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0009-6981-1040>

СКОЧИЛАС Андрій Юрійович, аспірант третього року навчання кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, skochliasy@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0003-5571-9696>

Vasyl ONYSHCHUK, PhD in Engineering, head of the department of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: V.Onyshchuk@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>

Stanislav STELMASHCHUK, third-year PhD student, Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University. stanislav0077@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0009-6981-1040>

Andriy SKOCHYLIAS, third-year PhD student, Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, skochliasy@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0003-5571-9696>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1739

Орисенко О.В., Шаповал М.В., Криворот А.І., Васильєв О.С.
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРУДОМІСТКОСТЕЙ ТА ВАРТОСТІ ОПЕРАЦІЙ ТО КРОСОВЕРІВ TOYOTA RAV4 2.0 AWD-I ТА TOYOTA RAV4 HYBRID AWD-I В УМОВАХ СТО

У роботі запропоновано визначення трудомісткостей проведення ТО автомобілів (кросоверів) з різними конструктивними концепціями одного модельного класу за методиками визначення трудомісткостей ТО та проведено порівняльний аналіз трудомісткостей задля перспектив розвитку запровадження інноваційних автомобілів за новітніми технологіями.

Для вирішення поставлених задач використовувались: математичні методи, методи прикладної механіки, основні положення визначення надійності автомобілів, статистична обробка зібраних експериментальних даних, комп'ютерне програмування та логічний аналіз проблематики.

Дослідження проводились з використанням технічних показників автомобілів, переліком операцій проведення ТО автомобілів, нормованого часу на проведення операцій ТО (діагностичні, обслуговуючі операції), статистичними даними проведення ТО, рекомендаціями технічного персоналу СТО.

Обґрунтованість та встановлення нових положень, аналіз, представлення висновків та рекомендацій у науково-практичній роботі забезпечено застосуванням законів математичної статистики, класичної механіки, конкретикою постановки задач, застосуванням математичних методів. Достовірність науково-практичних результатів роботи зумовлено застосуванням апробованих методик досліджень, адекватністю математичних моделей, обґрунтованим вибором обладнання, технічних засобів, діагностичної, контрольно-вимірювальної апаратури та обробкою експериментальних даних із застосуванням методик планування експериментальних досліджень та математичної статистики. Адекватність аналітичних досліджень порівнювалася з результатами чисельного розрахунку з результатами даних аналітичного дослідження у реальних промислових умовах, що включають режими проведення операцій ТО, а також різних технічних рішень.

Ключові слова: технічне обслуговування, трудомісткість проведення ТО, кросовери, коефіцієнт коригування періодичності ТО, вартість ТО, спеціальні пристрої діагностики.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку автомобільної індустрії актуальною є задача високоефективного оснащення технічних служб, СТО, автотранспортних підприємств, які забезпечували б підтримку транспортних засобів у технічно справному стані. Це призведе до зниження витрат на експлуатацію транспортних засобів (витрати на пально-мастильні матеріали, шини, запасні частини, а також на технічне обслуговування і ремонт). Невід'ємною частиною в технологічному процесі ТО та ремонті автомобілів є діагностування, яке дозволяє як суб'єктивно так і об'єктивно оцінити технічний стан як автомобіля в цілому, так і окремих його складових вузлів і агрегатів. Зараз автомобільний ринок України поповнюється автотранспортними засобами нових конструктивних концепцій, що використовують альтернативні та нові види палива, при підвищенні технічних параметрів. Збільшується чисельність електрифікованого та гібридного транспорту та зростання транспортних засобів збільшеної вантажопідйомності і пасажиромісткості, а також вдосконалюється інфраструктура рухомого складу. Витрати на обслуговування та ремонт автомобілів на автотранспортних підприємствах, станціях обслуговування і на авторемонтних заводах залишається ще достатньо високими. У зв'язку з цим, необхідно вдосконалити системи ТО та ремонту автомобільного транспорту. Досконалою і перспективною системою ТО та ремонту автотранспорту необхідно вважати таку, яка як найкраще забезпечить взаємодію процесів технічного стану авто (а саме процесів зміни діагностичних параметрів) і процесів їх відновлення. Класичним прикладом такої ефективної системи є обслуговування та ремонт за технічним станом рухомого складу. ТО та ремонт автомобілів за технічним станом являється планово-запобіжний.

Періодичність і обсяг робіт технічної діагностики при цьому планують.

Запобіжний характер технічного діагностування забезпечується постійним спостереженням за працездатним та технічним станом автомобілів з метою своєчасного виявлення передвідмовного стану.

Принцип попередження відмов і несправностей є основним. ТО та ремонт автомобілів за технічним станом ґрунтується на глибоких знаннях їх показників, технічної діагностики та забезпечення високого рівня експлуатаційної технологічності конструкції. При ТО та ремонті авто за технічним станом з контролем рівня надійності машин, складові елементи рухомого складу експлуатують без обмежень ресурсу до повного відказу. Фактичний рівень надійності складових елементів авто (наприклад, параметр

потоків відмов) не повинен перевищувати визначений встановлений максимально допустимий статистичний рівень. У разі перевищення цього рівня за інших однакових умов для конкретних елементів рухомого складу кінцевий направляється на обслуговування або ремонт. При цьому, тимчасово встановлюється міжремонтний ресурс чи цикл, який розглядається як попередження про необхідність підвищення надійності даних елементів автомобіля. Щоб застосовувати цей метод, необхідно чітко організовувати систему збору та обробки статистичної інформації про відмови та несправності частин транспорту на АТП.

Проведення ТО та ремонту автомобілів за технічним станом із контролем параметрів технічного стану їх елементів дозволить значно зменшити витрати на ТО та ремонт рухомого складу в АТП.

Проведення ТО та ПР авто пов'язано з вимушеними витратами часу, матеріальних і фінансових ресурсів. Скорочення періодичності профілактичних робіт зумовлює збільшення витрат на проведення ТО, але знижує ймовірність аварійної відмови автомобіля під час експлуатації. Зростання періодичності ТО – знижує їх кількість, але збільшує трудомісткість на відновлення. Рациональна періодичність технічних впливів настає при мінімізації всіх витрат. Автомобілі працюють в різних умовах та режимах експлуатації. На працездатний стан роботи авто впливають якість дорожніх покриттів, умови експлуатації, атмосферно-кліматичні умови і культура праці [1]. Найбільш значний вплив на надійність автотранспорту здійснює стан поверхні дороги, який в нашій країні не завжди відповідає нормативним вимогам [2]. Поганий стан дороги призводить до підвищених енергетичних втрат ходової частини автомобіля і надмірним динамічним навантаженням в трансмісії при передачі крутних моментів від двигуна до коліс, що негативно впливає на технічний стан у цих системах. В складних умовах експлуатації авто необхідно зменшувати періодичність між профілактичними роботами та збільшувати трудомісткість відновлювальних робіт.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для визначення трудомісткостей ТО кросоверів Toyota RAV 4 з ДВЗ та Hybrid AWD-I в постгарантійний строк експлуатації, виникає необхідність застосувати нормативи трудомісткості за параметрами та характеристиками, що наведені в технічній документації на авто Toyota RAV 4 чи загально діючими нормативами.

Під час аналізу норми питомих трудомісткостей на ТО підлягали обробці для кросоверів Toyota RAV 4 з урахуванням того, що вони відносяться до відповідного середнього класу за робочими об'ємами силових агрегатів чи за потужністю. Так, загальна кількість нормативних даних для середнього класу кросоверів, становила 940 одиниць, з яких 460 одиниць для модифікацій кросоверів європейських компаній та 480 – азійських компаній. Авто середнього класу з робочим об'ємом ДВЗ 1,8...3,5 л відповідно, оснащені найбільшою кількістю видів ДВЗ за відповідним діапазоном об'ємів. Виникає необхідність провести статистичну обробку вибірки нормативних значень питомих трудомісткостей на ТО у кросоверів цього класу. Для кросоверів середнього класу маємо – $N_m = 407$ значень, в інтервалі від 0,040 до 0,295 н.год/1000 км. Кожен з інтервалів значень розбито на $n = 10$ розрядів з шириною $h = 0,026$ н.год/1000 км, за відповідними рекомендаціями наведеними, В.І. Павлюком (канд. техн. наук, доц. Луцького НТУ) [3].

Гістограми розподілу масиву трудомісткостей ТО кросоверів Toyota RAV 4 у нашому випадку випадкових величин за значенням їх появлень m_i , у відповідному розряді питомих трудовитрат t наведені на рисунку 1.

Математичне очікування випадкових величин можна вважати найбільш достовірною її величиною, яке в наших умовах можна використовувати, як значення середньої питомої трудомісткості на ТО авто середнього класу, що визначається сумою складових добутоків імовірних значень випадкових величин (середніх значень розрядів) – x_{cpi} на їхню частоту $r_{Ni} = \frac{m_i}{N}$ [2, 3]:

$$a \sum_{i=1}^n x_{cpi} \cdot \frac{m_i}{N}, \text{ ч.-год/1000 км.} \quad (1)$$

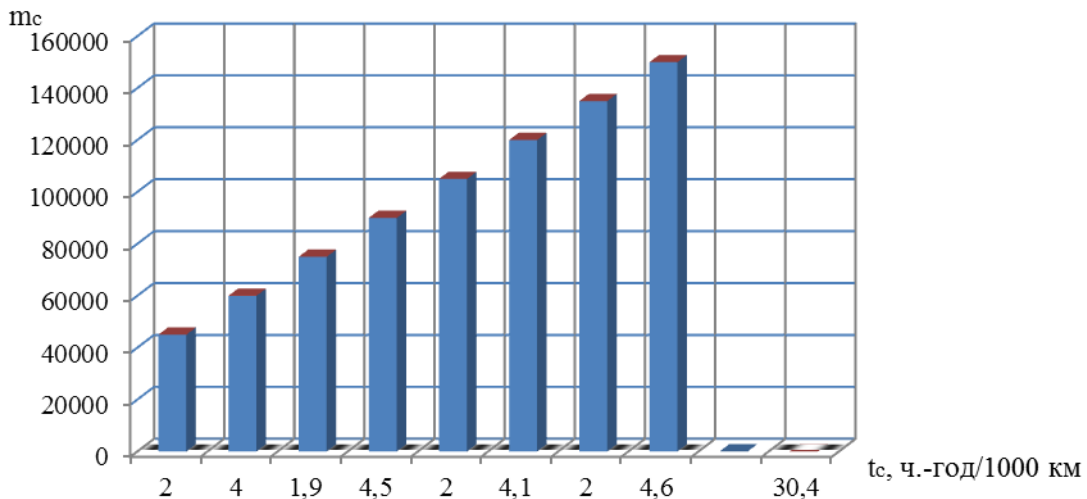


Рисунок 1 – Гістограма розподілу масиву емпіричних даних нормативних питомих трудомісткостей ТО кросоверів середнього класу.

Визначення дисперсії, що характеризує розсіювання випадкових величин [2, 3] визначаємо за формулою:

$$D = \sum_{i=1}^n (1 - \cos \varphi)^2, \text{ ч.-год/1000 км.} \quad (2)$$

Нульову гіпотезу відношення розподілу статистичних даних відповідному закону проведено за відповідним показником, а саме коефіцієнтом варіації $\nu = \sigma/a \cdot 100, \%$,

де σ – середньоквадратичне відхилення, $\sigma = \sqrt{D}$, ч.-год/1000 км.

Результати параметрів представлено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики розподілу випадкових величин питомої трудомісткості ТО авто середнього класу

№ п/п	Параметр розподілу	Одиниці вимірювання	Значення
			Середній клас
1	Математичне очікування випадкової величини, a	ч.-год/1000 км.	0,114
2	Дисперсія випадкової величини, D	ч.-год/1000 км.	0,002
3	Середньоквадратичне відхилення, σ	ч.-год/1000 км.	0,045
4	Коефіцієнт варіації, ν	%	39,693
5	Критерій згоди хі-квадрат Пірсона, χ^2		17,235

Гіпотезою про підпорядкування розподіленню логарифмічно-нормальному закону [3] характеризується теоретична щільність ймовірностей, оскільки справджується умова – $33\% \leq \nu \leq 88\%$. Загальний вигляд цього закону [3]:

$$f(x) = \frac{1}{x_{cpi} \cdot \sigma_{\ln x} \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2\sigma_{\ln x}^2}}, \quad (3)$$

де x – випадкове значення (аргумент).

Параметри конфігурації – $\sigma_{\ln x}$ та положення – $\sigma_{\ln x_0}$ [3]:

$$\sigma_{\ln x} = \sqrt{\ln(D + a^2) - 2 \cdot \ln a}. \quad (4)$$

$$\ln x_0 = 2 \cdot \ln a - \frac{1}{2} \cdot \ln(D + a^2) \quad (5)$$

Потрапляння випадкової величини в розряди до розміру цих розрядів h здійснюється за

відношенням частоти r_{Ni} , емпірична щільність ймовірності $p_i = \frac{r_{Ni}}{h}$ [3, 4]: Графічні залежності теоретичної і емпіричної щільності ймовірностей зображені на рисунку 2.

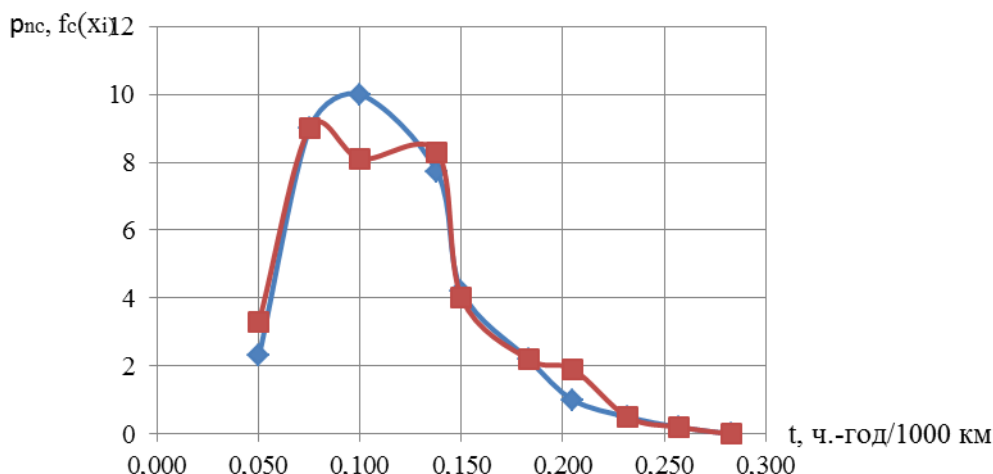


Рисунок 2 – Графічні залежності теоретичної і емпіричної щільності ймовірностей для даних нормативних питомих трудомісткостей ТО легкових автомобілів середнього класу.

Адекватність нульових гіпотез, перевіряється за допомогою критерію спільності хі-квадрат Пірсона, а саме погодження теоретичних (логарифмічно-нормального) і емпіричних розподілів. Значення критерію (за таблицю 1) визначиться за залежністю

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^n \frac{[p_i - f(x_i)]^2 \cdot h}{f(x_i)} \quad (6)$$

За отриманими результатами критерію згоди χ^2 і числа ступенів вільності – $U = n - S - l = 10 - 2 - 1 = 7$ ($S = 2$) – визначаємо число констант для логарифмічно-нормального розподілу [2], та за табличними даними значень ймовірностей закону Пірсона отримано [2, 3]:

– для кросоверів середнього класу $D_{\tilde{n}}(\chi_{\tilde{n}}^2, \alpha) = 0,017 \geq \alpha = 0,010$;

Рівень значимості $\alpha = 0,05$ характеризується значно жорсткими, а $\alpha = 0,01$ – менш жорсткими умовами перевірки адекватності прийнятої гіпотези [3].

А тому для кросоверів середнього класу є раціональною додаткова перевірка за критерієм Романовського [3]:

$$\frac{\chi^2 - x}{\sqrt{2 \cdot x}} \leq 3 \Rightarrow \frac{17,235 - 7}{\sqrt{2 \cdot 7}} = 2,735 \leq 3, \quad (7)$$

Тому, прийнята гіпотеза про логарифмічно-нормальний розподіл випадкової величини підтверджена для нашого випадку.

Таблиця 3 – Орієнтовні значення трудомісткостей на ТО легкових автомобілів на гарантійних умовах для фірмових СТО, ч.-год/1000км

Питома трудомісткість виду технічних впливів на кросовер ч.-год/1000 км	Клас легкового автомобіля середній 1.8...3,5 л
Технічне обслуговування	0,114

Питомі трудомісткості ТО, що можна буде використати на практиці, визначені математичним очікуванням випадкової величини у вибірках для середнього класу кросоверів. Результати наближених значень питомих трудомісткостей ТО для середньо розмірних кросоверів наведені в таблиці 3.

Слід зазначити, що трудомісткості на ТО кросоверів особливо малого та великого класу є орієнтовними в більшості випадків, адже визначені за незначною кількістю значень у вибірці. Трудомісткості на обслуговування кросоверів азійських автофірм, одержані аналогічно із застосуванням описаних методів, є збільшеними на 10–30% порівняно з трудомісткостями на

обслуговування кросоверів європейських виробників.

Проведений аналіз одержаних трудомісткостей дозволяє зробити висновок, що прийняті вибірки забезпечують загальну сукупність результатів нормативних величин питомих трудомісткостей ТО кросоверів фірмовими СТО. З удосконаленням конструкції сучасних кросоверів нормативи трудомісткостей повинні постійно коригуватися. У ході технологічного проектування сучасних фірмових СТО рекомендується використовувати уточнені значення трудомісткостей на обслуговування та незначний ремонт окремих моделей автомобілів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціль роботи проаналізувати технологічні процеси проведення ТО залежно від експлуатації автомобілів з ДВЗ та гібридів середньорозмірних кросоверів на матеріально-технічній базі фірмових СТО.

Метою дослідження є встановлення об'ємів проведення ТО автомобілів (кросоверів) з різними конструктивними концепціями одного модельного класу за методиками визначення трудомісткостей ТО та провести порівняльний аналіз трудомісткостей для перспектив розвитку запровадження інноваційних автомобілів за новітніми технологіями.

Для вирішення **поставлених задач** використовувались: математичні методи, методи прикладної механіки, основні положення визначення надійності автомобілів, статистична обробка зібраних експериментальних даних, комп'ютерне програмування та логічний аналіз проблематики.

Дослідження проводились з використанням технічних показників автомобілів, переліком операцій проведення ТО автомобілів, нормованого часу на проведення операцій ТО (діагностичні, обслуговуючі операції), статистичними даними проведення ТО, рекомендаціями технічного персоналу СТО.

Обґрунтованість та встановлення нових положень, аналіз, представлення висновків та рекомендацій у науково-практичній роботі забезпечено застосуванням законів математичної статистики, класичної механіки, конкретикою постановки задач, застосуванням математичних методів. Достовірність науково-практичних результатів роботи зумовлено застосуванням апробованих методик досліджень, адекватністю математичних моделей, обґрунтованим вибором обладнання, технічних засобів, діагностичної, контрольно-вимірювальної апаратури та обробкою експериментальних даних із застосуванням методик планування експериментальних досліджень та математичної статистики. Адекватність аналітичних досліджень порівнювалася з результатами чисельного розрахунку з результатами даних аналітичного дослідження у реальних промислових умовах, що включають режими проведення операцій ТО, а також різних технічних рішень.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Визначення витрат на обслуговування автомобіля за рік.

Визначення витрат на ТО кросовера за рік можна за залежністю:

$$Z_{ТОР} = Z_{ЩО} + Z_{ТО-1} + Z_{ТО-2} = C_{ЩО} \cdot D_{Г} + C_{ТО-1} \cdot N_{ТО-1} + C_{ТО-2} \cdot N_{ТО-2}, \quad (8)$$

де $Z_{ЩО}$, $Z_{ТО-1}$, $Z_{ТО-2}$ – витрати на ЩО, ТО-1, ТО-2, відповідно, грн.;

$C_{ЩО}$, $C_{ТО-1}$, $C_{ТО-2}$ – вартість проведення одного ЩО, ТО-1, ТО-2, відповідно, грн.;

$D_{Г}$ – кількість днів експлуатації кросовера;

$N_{ТО-1}$, $N_{ТО-2}$ – кількість обслуговувань ТО-1 і ТО-2 за рік, відповідно, одиниць;

$L_{рік}$ – пробіг кросовера за рік, км.

Кількість робіт по ТО за рік можна розрахувати за такими формулами:

$$N_{ТО-2} = \frac{L_{рік}}{L_{ТО-2}^{н}}; \quad N_{ТО-1} = \frac{L_{рік}}{L_{ТО-1}^{н}} - N_{ТО-2}, \quad (9)$$

де $L_{ТО-2}^{н}$, $L_{ТО-1}^{н}$ – нормативна періодичність ТО-1 і ТО-2, км.

Собівартість виконання одного обслуговування наближено можна визначити через годинний тариф T на виконання робіт:

$$C_{ЩО, ТО-1, ТО-2} = T_{ЩО, ТО-1, ТО-2} \cdot t_{ЩО, ТО-1, ТО-2} = (T_{НЧ} + T_{ТМЦ}) \cdot t_{ЩО, ТО-1, ТО-2}, \quad (10)$$

де $T_{НЧ}$ – вартість нормо-години на проведення робіт, грн./год.;

$T_{ТМЦ}$ – питома вартість товарно-матеріальних цінностей, грн./год.;

$t_{ЩО, ТО-1, ТО-2}$ – нормативна трудомісткість за видами впливів, люд.-год.

З урахуванням формул (9) і (10) залежність (8) набуде вигляду

$$Z_{TOP} = T_{\text{ЩО}} \cdot t_{\text{ЩО}} \cdot D_{\Gamma} + L_{Pik} \cdot \left(\frac{T_{TO} \cdot t_{TO-2}}{L_{TO-2}^H} + T_{TO} \cdot t_{TO-1} \cdot \left(\frac{1}{L_{TO-1}^H} - \frac{1}{L_{TO-2}^H} \right) \right). \quad (11)$$

Аналіз об'ємів робіт (трудомісткостей) під час ЩО, ТО-1, ТО-2 різних видів силових установок вказує на те, що у залежність (11) необхідно внести поправочний коефіцієнт $k_{\text{щО}, \text{ТО-1}, \text{ТО-2}}^{3M}$ який здійснить корегування витрат на ТО автомобілів.

Визначаємо витрати на ТО кросовера Toyota RAV4 (2.0 Dual VVT-i AWD-i Direct Shift CVT PREMIUM). Приймаємо, що за рік автомобіль проїде $L_{Pik} = 60000$ км, при цьому він був в експлуатації $D_{\Gamma} = 205$ днів за рік. За літературним джерелом [1] приймаємо: $t_{\text{ЩО}} = 0,5$ люд. год.; $t_{TO-1} = 2,9$ люд. год.; $t_{TO-2} = 11,7$ люд. год.; $L_{TO-2}^H = 20000$ км, $L_{TO-1}^H = 5000$ км. Тариф на ТО автомобіля приймаємо – 50 грн. Тоді для кросовера Toyota RAV4 (2.0 Dual VVT-i AWD-i Direct Shift CVT PREMIUM)4, на ТО за рік необхідно витратити

$$Z_{TOP} = 50 \cdot 0,5 \cdot 205 + 60000 \cdot \left(\frac{50 \cdot 11,7}{20000} + 50 \cdot 2,9 \cdot \left(\frac{1}{5000} - \frac{1}{20000} \right) \right) = 8185 \text{ грн.}$$

Визначення витрат на обслуговування автомобілів Toyota RAV4 AWD-i та Toyota RAV4 (Hybrid) AWD-i, з урахуванням коригуючого коефіцієнта.

Якщо автомобіль Toyota RAV4, проїде шлях 200 000 км, то витрати на ТО і ПР складуть близько 90 тис. грн. Вартість кросовера Toyota RAV4 на даний момент у комплектації (Toyota RAV4 2.0 Dual VVT-i AWD-i Direct Shift CVT PREMIUM), сьогодні становить 1 623 398, грн. Виробники, а також дилерські компанії пропонують для кросоверів після постгарантійного строку проводити ТО через 15 000 тис. км, чергуючи ТО-1 з ТО-2.

Таблиця 4 – Вартість обслуговування Toyota RAV4 2.0 AWD-i ТОВ "Компанія "Стар Лайн"

Пробіг, км	Норматив часу, н/год	Видатковий матеріал, грн.	Вартість робіт, грн з ПДВ	Вартість витратних матеріалів, грн з ПДВ.	Загальна вартість ТО*
15000	1,4	-	1400,0	1957,0	3357,0
30000	3,9	132,66	3900,0	6426,0	10326,0
45000	2,0	-	2000,0	1957,0	3957,0
60000	4,0	223,78	4000,0	6426,0	10426,0
75000	1,9	-	1900,0	1957,0	3857,0
90000	4,5	132,66	4500,0	10414,0	14914,0
105000	2,0	-	2000,0	1957,0	3957,0
120000	4,1	132,66	4100,0	6426,0	10526,0
135000	2,0	-	2000,0	1957,0	3957,0
150000	4,6	223,78	4600,0	9366,0	13966,0
Разом	30,4	845,54	30400,0	48843,0	79243,0

Вартість нормо-години на технічне обслуговування кросовера Toyota RAV4, становить 260 ... 325 грн. залежно від пробігу. Середня питома вартість товарно-матеріальних цінностей становить 1000 ... 2000 грн./год. Витрати на ТО при різних пробігах автомобіля наведені в табл. 4.

Якщо розрахунок проводити за формулою (11) з періодичністю, яка встановлена в положенні [1], і враховувати тільки витрати на ТО-1 і ТО-2, то на 60 тис. км пробігу необхідно затратити 3060 грн. Якщо ж проводити ТО з періодичністю заводу-виробника, то витрати на одне ТО-1 (при 45000 км) і одне ТО-2 (при 60000 км) складуть близько 5000 грн. При пробігу 210 тис. км розрахункові витрати за формулою (11) складуть 78976 грн, а за даними в табл. 4 – 79243,80 грн.

Рекомендована періодичність ТО-1 в 5000 км [3] для легкових автомобілів вже не відповідає сучасним рівням надійності. Необхідно в законодавстві встановлювати диференційовані нормативні значення періодичності ТО залежно від марки та моделі транспортного засобу.

Річний пробіг автомобіля можливо оцінити наступним чином

$$L_{Pik} = L_{CC} \cdot D_{\Gamma} = V \cdot T_H \cdot D_{\Gamma}, \quad (12)$$

де L_{CC} – середньодобовий пробіг автомобіля, км;

V – середня експлуатаційна швидкість автомобіля, км/год.;

T_H – час роботи автомобіля в наряді, год. Перепишемо формулу (11) з урахуванням виразу (12).

Тоді

$$3_{TOP} = D_{\Gamma} \cdot \left(T_{\text{ЩО}} \cdot t_{\text{ЩО}} + V \cdot T_H \cdot \left(\frac{T_{TO} \cdot t_{TO-2}}{L_{TO-2}^H} + T_{TO} \cdot t_{TO-1} \cdot \left(\frac{1}{L_{TO-1}^H} - \frac{1}{L_{TO-2}^H} \right) \right) \right), \quad (13)$$

Зі зменшенням середньої швидкості автомобіля відстань, яку автомобіль подолає за рік, також знижується. Також зменшується кількість обслуговувань за рік, що зумовлює витрати на ТО і ТР. На рис. 1 наведено графік зміни вартості профілактичних і ремонтних робіт для автомобіля Toyota RAV4 AWD-i, з урахуванням середньої експлуатаційної швидкості. Час в наряді приймався рівним 7 год. Якщо середню швидкість автомобіля прийняти 42 км/год., то можна отримати попередні результати. Зниження швидкості автомобіля може бути викликано погіршенням умов експлуатації. В таких умовах необхідно скорочувати періодичність ТО або збільшувати трудомісткість ТО. В роботі [7] запропоновано аналітичний метод обчислення коригуючого коефіцієнта, який отримано методом подібності характеристики ресурсу автомобіля і витрати палива. Коригуючий коефіцієнт можна розрахувати так:

$$k_m = \left(\frac{7,95 \cdot K_c \cdot i_o \cdot i_{kp} \cdot V_{max} \cdot a_m \cdot V_h}{r_k} + \frac{0,7 \cdot K_c^2 \cdot i_o^2 \cdot i_{kp}^2 \cdot V_{max}^2 \cdot b_m \cdot V_h \cdot S_n}{r_k} + \right. \\ \left. + \frac{100(G_a \cdot 0,01 \cdot V_{max} + 0,077 \cdot k \cdot F \cdot V_{an}^3)}{\eta_{mp}} \right) \cdot \frac{V_a}{V_{an}} \left/ \left(\frac{7,95 \cdot K_c \cdot i_o \cdot i_{kp} \cdot V_{max} \cdot a_m \cdot V_h}{r_k} + \right. \right. \quad (14) \\ \left. \left. + \frac{0,7 \cdot K_c^2 \cdot i_o^2 \cdot i_{kp}^2 \cdot V_{max}^2 \cdot b_m \cdot V_h \cdot S_n}{r_k^2} + \frac{100(G_a \cdot 0,01 \cdot V_{max} + 0,077 \cdot k \cdot F \cdot V_{an}^3)}{\eta_{mp}} \right) \right\}, \text{ дм}^3.$$

де K_c – швидкісний коефіцієнт;

i_o – передавальне число головної передачі;

i_{kp} – передавальне число підвищеної (максимальної) передачі коробки передач;

V_{max} – максимальна швидкість автомобіля, км/год.;

a_m, b_m – коефіцієнти механічних втрат в двигуні;

V_h – робочий об'єм циліндрів двигуна, л;

r_k – динамічний радіус колеса, м;

S_n – хід поршня, м; G_a – вага автомобіля в нормованому стані, Н;

kF – фактор обтічності, Н·с²·м⁻².

У загальну формулу коефіцієнта коригування періодичності (2.18) підставимо параметри автомобіля Toyota RAV4 AWD-i. Приймаються такі значення параметрів: $a_m = 45$ кПа, $V_h = 1,781$ л, $H_n = 44000$ кДж/кг, $c_m = 0,76$ г/см³, $K_c = 0,52$, $i_o = 3,647$, $i_{kp} = 0,8$, $V_{max} = 190$ км/год., $r_k = 0,3$ м, $b_m = 13$ кПа·с/м, $S_n = 0,081$ м, $G_{a \text{ RAV4}} = 17450$ Н, (для спорядженого автомобіля), $G_{a \text{ RAV4}} = 21550$ Н, (для повністю навантаженого автомобіля), $kF = 0,47$ Н·с²/м², $\eta_{mp} = 0,93$, $V_{an} = 90$ км/ч.

Тоді залежність коефіцієнта коригування періодичності ТО для автомобіля Toyota RAV4 AWD-i матиме вигляд:

– для порожнього автомобіля:

$$k_m = \frac{9,16 \cdot V}{541 + 0,000389 \cdot V^3}. \quad (15)$$

– для повністю завантаженого:

$$k_m = \frac{10,59 \cdot V}{669 + 0,000389 \cdot V^3}. \quad (16)$$

Для автомобілів Toyota RAV4 Hybrid AWD-i, приймаються такі значення параметрів: $a_m = 32$ кПа, $V_h = 1,580$ л, $H_n = 41250$ кДж/кг, $c_m = 0,71$ г/см³, $K_c = 0,49$, $i_0 = 3,628$, $i_{kp} = 0,74$, $V_{max} = 185$ км/год., $r_k = 0,3$ м, $b_m = 13$ кПа·с/м, $S_n = 0,076$ м, $G_{a\ RAV4} = 18050$ Н, (для спорядженого автомобіля), $G_{a\ RAV4} = 22250$ Н, (для повністю навантаженого автомобіля), $kF = 0,45$ Н·с²/м², $\eta_{mp} = 0,94$, $V_{an} = 90$ км/ч.

Витрати на ТО при різних пробігах автомобіля наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Вартість обслуговування Toyota RAV4 Hybrid AWD-i, ТОВ "Компанія "Стар Лайн"

Пробіг, км	Норматив часу, н/год	Видатковий матеріал, грн.	Вартість робіт, грн з ПДВ	Вартість витратних матеріалів, грн з ПДВ.	Загальна вартість ТО*
15000	1,7	-	1700,0	2289,0	3989,0
30000	3,4	132,66	3400,0	4940,0	8340,0
45000	2,3	-	2300,0	2091,0	4391,0
60000	3,5	223,78	3500,0	4940,0	8440,0
75000	2,2	-	2200,0	2028,0	4228,0
90000	4,4	132,66	4400,0	9986,0	14386,0
105000	2,2	-	2200,0	2289,0	4489,0
120000	3,5	132,66	3500,0	4940,0	8440,0
135000	2,3	-	2300,0	2091,0	4391,0
150000	4,1	223,78	4100,0	7924,0	12024,0
Разом	29,6	845,54	29600,0	43518,0	73118,0

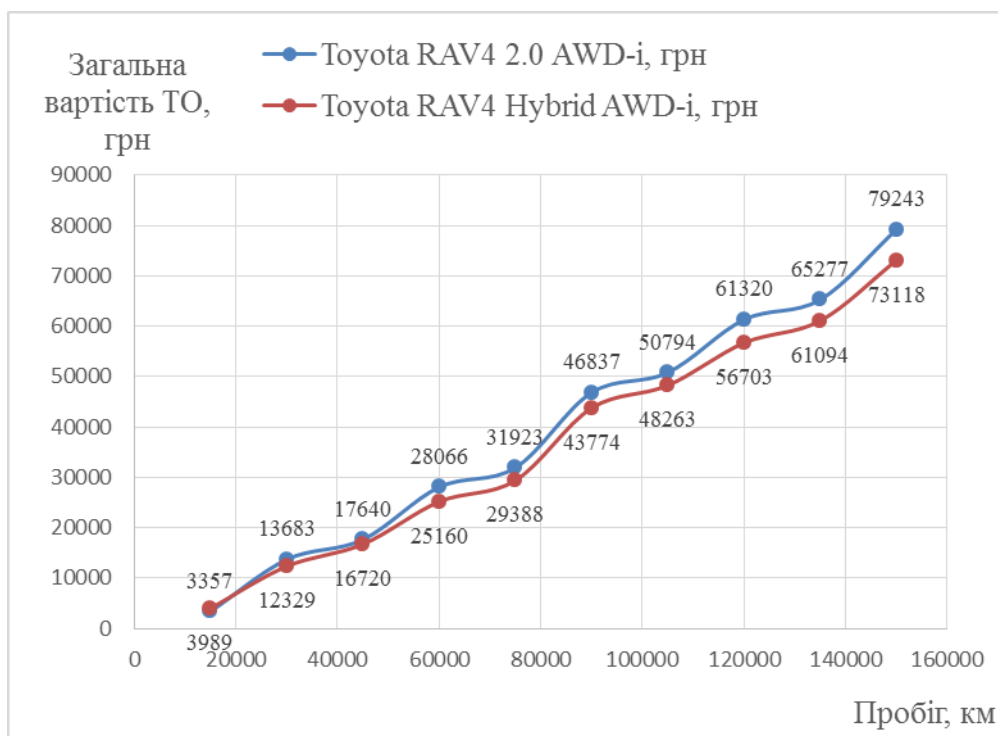


Рисунок 3 – Залежність загальної вартості проведення періодичного ТО за пробігом Toyota RAV4 2.0 AWD-i ТОВ "Компанія "Стар Лайн"

У таблицях 6, 7 та на рисунку 4, наведені значення коефіцієнта коригування, який розраховано за формулами, (8-14) різних категорій доріг. Для порівняння наведені коефіцієнти коригування періодичності ТО за методиками [3] і [7]. Запропонована модель дає близькі значення коефіцієнта щодо наведених в інших джерелах. Вплив ступеня завантаження автомобіля на періодичність та вартість ТО автомобілів не враховувались в інших методиках.

Залежність коефіцієнта коригування періодичності ТО для автомобіля Toyota RAV4 Hybrid AWD-i матиме вигляд:

– для порожнього автомобіля:

$$k_m = \frac{11,87 \cdot V}{537 + 0,000389 \cdot V^3}, \quad (17)$$

– для повністю завантаженого:

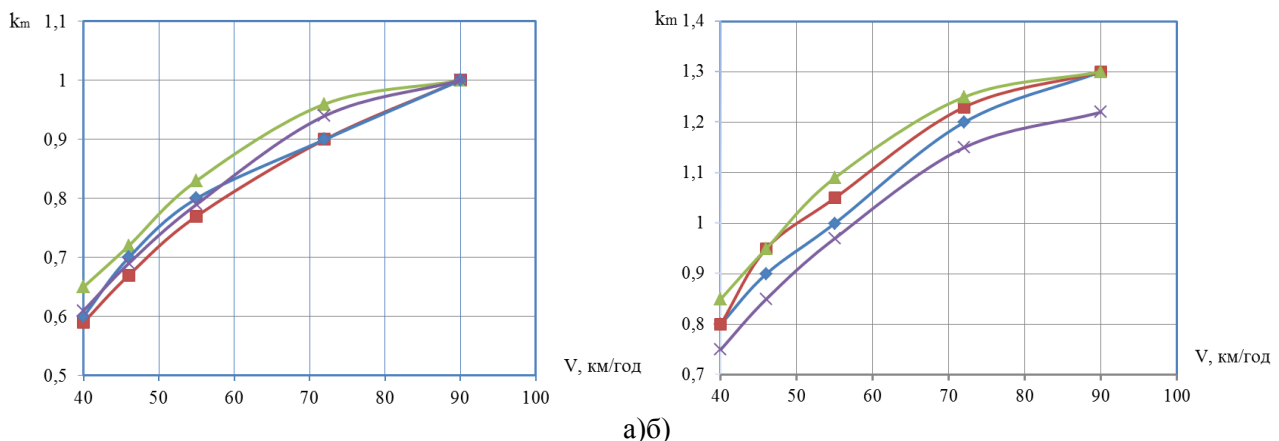
$$k_m = \frac{12,76 \cdot V}{656 + 0,000389 \cdot V^3}. \quad (18)$$

Таблиця 6 – Значення коефіцієнта коригування періодичності ТО автомобіля Toyota RAV4 AWD-i, які отримані за різними методиками

Категорія умов експлуатації	Середня швидкість, км/год	Коригування періодичності ТО			
		за методикою 1	за методикою 2	за формулою	
				(15)	(16)
1	90	1,0	1,0	1,0	1,0
2	72	0,9	0,9	0,96	0,94
3	55	0,8	0,77	0,83	0,79
4	46	0,7	0,67	0,72	0,69
5	40	0,6	0,59	0,65	0,61

Таблиця 7 – Значення коефіцієнта коригування періодичності технічних обслуговувань автомобіля Toyota RAV4 Hybrid AWD-i, які отримані за різними методиками

Категорія умов експлуатації	Середня швидкість, км/год	Коригування періодичності ТО			
		за методикою 1	за методикою 2	за формулою	
				(17)	(18)
1	90	1,3	1,3	1,3	1,22
2	72	1,2	1,23	1,25	1,15
3	55	1,0	1,05	1,09	0,97
4	46	0,9	0,95	0,95	0,85
5	40	0,8	0,8	0,85	0,75



а)б)

Рисунок 4 – Графічні залежності коефіцієнта коригування періодичності технічних обслуговувань:

- а) автомобіля Toyota RAV4 AWD-i, які отримані за різними методиками: $\diamond$ – за методикою 1; $\blacksquare$ – за методикою 2; $\blacktriangle$ – за формулою (15); $\times$ – за формулою (16);
 б) автомобіля Toyota RAV4 Hybrid AWD-i, які отримані за різними методиками: $\diamond$ – за методикою 1; $\blacksquare$ – за методикою 2; $\blacktriangle$ – за формулою (17); $\times$ – за формулою (18)

У таблицях 6, 7 та на рисунках 4, 5 наведені значення коефіцієнта коригування, який розраховано за формулами (8-14) для різних категорій доріг. Для порівняння наведені коефіцієнти коригування періодичності ТО за методиками [4] і [5]. Запропонована модель дає близькі значення коефіцієнта щодо наведених в інших джерелах. Вплив ступеня завантаження автомобіля на періодичність та вартість ТО автомобілів не враховувались в інших методиках [3, 4, 5].

Для використання коефіцієнта коригування необхідно замінити нормативні значення

L_{TO-2}^H і L_{TO-1}^H такими виразами:

$$L_{TO-2} = L_{TO-2}^H \cdot k_m, \quad L_{TO-1} = L_{TO-1}^H \cdot k_m \quad (19)$$

Остаточню

$$Z_{TOP} = D_T \cdot \left(T_{\text{ЩО}} \cdot t_{\text{ЩО}} + V \cdot T_H \cdot \left(\frac{T_{TO} \cdot t_{TO-2}}{L_{TO-2}^H \cdot k_m} + T_{TO} \cdot t_{TO-1} \cdot \left(\frac{1}{L_{TO-1}^H \cdot k_m} - \frac{1}{L_{TO-2}^H \cdot k_m} \right) \right) \right). \quad (20)$$

У формулі (20) коефіцієнт k_m пропорційно пов'язаний з L_{TO-1}^H і L_{TO-2}^H та обернено пропорційно пов'язаний з t_{TO-1} , t_{TO-2} . Тому, можна виконувати коригування витрат як на трудомісткість ТО, так і за періодичністю ТО.

На рис. 5 наведена графічна залежність зміни вартості ТО від швидкості руху при обліку умов експлуатації. У складних умовах експлуатації, коли швидкість автомобіля знижується, вартість витрат на ТО за формулою (13) більше ніж витрати, які розраховані за формулою (20). При середній швидкості 40 км/год. різниця становить близько 12 %, а при швидкості 20 км/год. – 30%. Ступінь завантаження автомобіля також впливає на вартість ТО. Зі збільшенням ваги автомобіля витрати зростають. Так, при швидкості 40 км/год. різниця вартості ТО для автомобіля в спорядженому і максимально завантаженому стані складе відповідно 3,7, 2,4, 1,7%, а при швидкості 30 км/год. – 4,2, 3,1, 1,9%.



Рисунок 5 – Зміна вартості технічного обслуговування: кросовера Toyota RAV4 Hybrid AWD-i, від швидкості руху без урахування (1), (2) і з урахуванням умов експлуатації автомобіля, Toyota RAV4 2.0 AWD-i, від швидкості руху без урахування (3), і з урахуванням (4) умов експлуатації

Також видно тенденції зростання витрат на ТО автомобілів при швидкості 100 км/год., у автомобіля Toyota RAV4 Hybrid AWD-i вони менші на 23% по відношенню до автомобілів Toyota RAV4 2.0 AWD-i.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Представлена робота є закінченою науково-дослідницькою роботою, в якій на підставі порівняльного аналізу визначено експлуатаційні можливості двох споріднених кросоверів різних концептуально технічних рішень шляхом статистичної обробки нормативних даних, що знайшли відображення в наступному:

1. Проаналізовано конструктивні та технічні параметри систем управління новітніх гібридних технологій, які забезпечать покращення технічних параметрів авто в цілому, екологічність та економічність палива під час експлуатації, загальну надійність. Результати вказують на те, що незважаючи на ускладненість конструкції гібридних авто за рахунок повного впровадження мехатронних систем у концепції транспортних засобів на прикладі кросоверів марки Toyota, а також складних алгоритмів контролю та управління процесами, що протікають під час руху авто переваги очевидні з точки зору експлуатаційних властивостей на основі загальної надійності, екологічності та відносно зменшеним трудомісткостям проведення ТО та кошторисних витрат.

2. Представлені аналітичні дослідження з трьома математичними методиками дозволяє оцінити вартість проведення ТО кросоверів з урахуванням умов його експлуатації. Отримані результати можна використати в процесі прогнозування процесів проведення ТО та управління СТО чи

ремонтного підприємства автомобільного транспорту. Подальші дослідження можна спрямувати на облік інших експлуатаційних факторів, що впливають на вартість експлуатації кросоверів.

ВИСНОВКИ

Представлені аналітичні дослідження з трьома математичними методиками дозволяє оцінити вартість проведення ТО кросоверів з урахуванням умов його експлуатації. Отримані результати можна використати в процесі прогнозування процесів проведення ТО та управління СТО чи ремонтного підприємства автомобільного транспорту. Подальші дослідження можна спрямувати на облік інших експлуатаційних факторів, що впливають на вартість експлуатації кросоверів.

За результатами аналітичних досліджень видно, що трудомісткість проведення ТО менша під час обслуговування Toyota RAV4 Hybrid AWD-і по відношенню до Toyota RAV4 AWD-і, що пов'язано із меншою кількістю операцій на ТО, витратами на запасні частини та матеріали, більшим ресурсом (надійністю), експлуатаційними якостями силових агрегатів та частково періодичністю до ТО.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Правила надання послуг з технічного обслуговування і ремонту колісних транспортних засобів [Електронний ресурс] / Міністерство інфраструктури України. Затв. Наказ № 615 від 28.11.2014. Чинний від 12.02.2015р. Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z1609-14>.
2. Карпенко В.Р. Трудовитрати на обслуговування легкових автомобілів фірмовими СТО / В.Р. Карпенко, В.І. Павлюк, О.В. Приймак // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник. – Вип. № 31 – Луцьк, 2011. – С. 143–145.
3. В. І. Павлюк, канд. техн. наук, доц. Луцький НТУ Питомі трудомісткості обслуговування легкових автомобілів фірмовими СТО ISSN 2079-0066. Вісник НТУ «ХПІ». 2015. № 9 (1118)1,2. – стор. 92-97. М., 1987 р. – 380 с.
4. В.В. Аулін Удосконалення процесу технічного обслуговування автомобілів, використанням сучасних електронних методів діагностики / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, Д.Є. Панарін / Вісник інженерної академії України. Комунікації (транспортні системи та ін.) № 3-4, 2013. – С. 151-157.
5. Павленко В. М. Визначення можливості використання мультиагентного підходу при виконанні технічного обслуговування і ремонту автомобіля / В. М. Павленко, В. П. Кужель: Вісник машинобудування та транспорту, 2018. – №1(7). – С. 72-80.
6. Кривошапов, С. І. Корегування ресурсу та періодичності технічного обслуговування транспортних машин за методикою нормування витрати палива / Кривошапов С. І. // Автомобільний транспорт : зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України; ХНАДУ ; редкол.: А. В. Гнатов (гол. ред.) та ін. - Харків, 2020. – Вип. 46. – С. 78-85.
7. Кучерявий О.П., Попов С.Ю. "Теорія експлуатаційних властивостей автомобілів". – Харків: ХНАДУ, 2009. – 416 с.

REFERENCES

1. Rules for the provision of services for technical maintenance and repair of wheeled vehicles [Electronic resource] / Ministry of Infrastructure of Ukraine. Approved by Order No. 615 of 11/28/2014. Effective from 02/12/2015. Access mode: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z1609-14>.
2. Karpenko V.R. Labor costs for servicing passenger cars by branded service stations / V.R. Karpenko, V.I. Pavlyuk, O.V. Pryymak // Scientific notes: Interuniversity collection. – Issue No. 31 – Lutsk, 2011. – P. 143–145.
3. V.I. Pavlyuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Lutsk NTU Specific labor intensity of servicing passenger cars by branded service stations ISSN 2079-0066. Bulletin of NTU "KhPI". 2015. No. 9 (1118)1,2. – pp. 92-97. M., 1987 – 380 p.
4. V.V. Aulin Improving the process of technical maintenance of vehicles using modern electronic diagnostic methods / V.V. Aulin, , S.V. Lysenko, D.E. Panarin, / Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. Communications (transport systems, etc.) No. 3-4, 2013. – pp. 151-157.
5. Pavlenko V. M. Determining the possibility of using a multi-agent approach when performing technical maintenance and repair of a vehicle / V. M. Pavlenko, V. P. Kuzhel: Bulletin of Mechanical Engineering and Transport, 2018. – No. 1(7). – pp. 72-80.
6. Kryvoshapov, S. I. Adjustment of the resource and periodicity of technical maintenance of transport vehicles using the method of fuel consumption rationing / Kryvoshapov S. I. // Automobile transport: collection of scientific works / Ministry of Education and Science of Ukraine; KhNADU; editors: A. V. Gnatov (ed. chief) and others - Kharkiv, 2020. – Issue 46. – P. 78-85.
7. Kucheryavyi O.P., Popov S.Yu. "Theory of operational properties of vehicles". – Kharkiv:

Orysenko O.V., Shapoval M.V., Kryvorot A.I. Vasiliev O.S. Research and comparative analysis of the labor intensifiedness and costs of operations for Toyota Rav4 2.0 AWD and Toyota Rav4 hybrid AWD crossovers in service shop conditions

The paper proposes the determination of the labor intensity of maintenance of cars (crossovers) with different design concepts of the same model class using the methods of determining the labor intensity of maintenance and a comparative analysis of the labor intensity for the development prospects of the introduction of innovative cars using the latest technologies was conducted.

To solve the problems set, the following were used: mathematical methods, methods of applied mechanics, basic provisions for determining the reliability of cars, statistical processing of collected experimental data, computer programming and logical analysis of the problem.

The research was conducted using technical indicators of cars, a list of operations for maintenance of cars, standard time for maintenance operations (diagnostic, servicing operations), statistical data for maintenance, recommendations of service station technical personnel.

The validity and establishment of new provisions, analysis, presentation of conclusions and recommendations in scientific and practical work is ensured by the application of the laws of mathematical statistics, classical mechanics, the specifics of the problem statement, and the use of mathematical methods. The reliability of scientific and practical results of the work is due to the use of proven research methods, the adequacy of mathematical models, a reasonable choice of equipment, technical means, diagnostic, control and measuring equipment and processing of experimental data using experimental research planning methods and mathematical statistics. The adequacy of analytical studies was compared with the results of numerical calculations with the results of analytical research data in real industrial conditions, including modes of maintenance operations, as well as various technical solutions.

Key words: maintenance, labor intensity of maintenance, , crossovers, maintenance frequency adjustment coefficient, maintenance cost, special diagnostic devices.

ОРИСЕНКО Олександр Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" e-mail: oleksandr.orysenko@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3103-0096>

ШАПОВАЛ Микола Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" e-mail: nvshapoval75@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-6943-7687>

КРИВОРОТ Анатолій Ігорович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" e-mail: anatoliikryvorot@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5919-7352>

ВАСИЛЬЄВ Олексій Сергійович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" e-mail: a.s.vasiliev.76@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>

Oleksandr ORISENKO, PhD in Engineering, associate professor, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, National University "Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk" e-mail: oleksandr.orysenko@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3103-0096>

Mykola SHAPOVAL, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, National University "Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk" e-mail: nvshapoval75@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-6943-7687>

Anatoliy KRIVOROT, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, National University "Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk" e-mail: anatoliikryvorot@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5919-7352>

Oleksiy VASILIEV, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, National University "Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk" e-mail: a.s.vasiliev.76@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>

Петрюк Ю.І. Артюх О.М.
Національний університет «Запорізька політехніка»

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗЕМЛЕРОБСТВА: АВТОМАТИЗАЦІЯ І РОБОТИЗАЦІЯ МАШИНОТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ҐРУНТІВ

Сучасний агросектор України потребує техніки, яка відповідатиме вимогам точного землеробства та працюватиме ефективно у специфічних умовах. Проблеми, пов'язані із застарілим обладнанням і високою вартістю імпортової техніки, спонукають шукати нові рішення для створення конкурентоспроможної української продукції. Традиційні методи обробки землі вже не здатні задовольняти вимоги сучасного аграрного виробництва, тому автоматизація і роботизація машинно-тракторних агрегатів стають необхідними для оптимізації витрат і збереження родючості ґрунтів.

Метою цього дослідження є аналіз сучасних підходів до автоматизації та роботизації сільськогосподарської техніки, а також визначення можливостей їх впровадження у вітчизняному виробництві.

Для досягнення цієї мети застосовано методи аналізу літературних джерел, порівняння існуючих моделей техніки, а також метод експертного оцінювання. Особлива увага приділена вивченню результатів попередніх досліджень з автоматизації та роботизації сільськогосподарського обладнання, щоб визначити найбільш перспективні напрями для адаптації в Україні.

Результати показали, що існує значний потенціал для розвитку української сільськогосподарської техніки, орієнтованої на автоматизацію. Імплементация сучасних технологій управління, включно з роботизованими системами та навігацією, може суттєво підвищити продуктивність, знизити витрати та покращити адаптивність до умов агровиробництва. Згідно з висновками, впровадження технологічних інновацій у виробництво української сільськогосподарської техніки відкриє шлях до підвищення конкурентоспроможності галузі. Це дозволить фермерам отримати сучасну й доступну техніку, яка відповідатиме високим вимогам агробізнесу.

Ключові слова: сільськогосподарська техніка, техніко-технологічне забезпечення, врожайність, економічний ефект, оптимізація витрат, збереження родючості ґрунтів.

ВСТУП

Сучасне сільське господарство зіштовхується з багатьма викликами, що впливають на економічну ефективність та екологічну стійкість виробництва. У контексті глобальних змін та зростаючих вимог до якості та кількості продукції постає питання оптимізації витрат та збереження родючості ґрунтів, що стає критично важливим аспектом землеробства. Традиційні методи та технології, що використовуються сьогодні для вирощування сільськогосподарських культур, потребують значних фінансових і технічних ресурсів, а також не завжди відповідають сучасним вимогам щодо ефективності використання ґрунтових ресурсів. Важливим є також той факт, що значна частина техніки, яка застосовується в агросекторі України, є або застарілою, або імпортованою від провідних іноземних виробників. Це призводить до високої вартості експлуатації, складностей з обслуговуванням та залежності від імпорту запасних частин.

В умовах такої ситуації необхідно шукати інноваційні підходи до землеробства, серед яких особливе значення має автоматизація та роботизація машинно-тракторних агрегатів. Використання сучасних технологій дозволить оптимізувати витрати на техніку та її обслуговування, покращити контроль за виконанням агротехнічних робіт, мінімізувати шкоду для ґрунтів та раціоналізувати використання ресурсів. Водночас актуальним стає питання створення і розвитку власного, українського високотехнологічного машинно-тракторного парку, який зміг би стати конкурентним аналогом зарубіжної техніки.

Таким чином, проблема полягає в необхідності аналізу існуючих технологій та розробки стратегічних напрямів впровадження роботизованої та автоматизованої техніки в Україні, що сприятиме підвищенню ефективності та екологічної стійкості землеробства, а також забезпеченню економічної незалежності українського агросектору від закордонного обладнання.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Значна частина досліджень акцентує увагу на перевагах автоматизованої техніки для точного землеробства, адже така техніка дозволяє ефективніше використовувати ресурси, знижувати витрати й зменшувати негативний вплив на навколишнє середовище. У своїх роботах Саржанов О. А., Таценко О. В. [1], Пивовар П. В., Шлапак М. А. [2] обґрунтовують, що інновації в аграрній техніці

сприяють не лише збільшенню врожайності, але й загальному зростанню конкурентоспроможності агросектору.

Серед провідних тем, що порушуються у публікаціях, – необхідність адаптації новітніх рішень під специфіку локальних умов, що стає вирішальним фактором для розвитку українського агросектору. Особливо важливим аспектом є здатність сучасних машин підлаштовуватися під різні кліматичні умови, стан ґрунтів, структуру посівних площ. Дослідники Русан В., Жураковська Л. [3], Захарчук О. В., Навроцький Я. Ф., Вишневецька О. В. [4] підкреслюють, що в Україні важливо забезпечити доступ до техніки, яка є не лише високоефективною, але й доступною за ціною та обслуговуванням, що надасть нові можливості як великим агропідприємствам, так і малим фермерським господарствам.

Окремі дослідження акцентують увагу на проблемах, що виникають із використанням імпоротної техніки в Україні. Чимало фермерів відчують труднощі з сервісним обслуговуванням, яке інколи недоступне або потребує великих затрат через відсутність відповідної інфраструктури. Крім того, Сітковська А. О., Савенко О. А., Капуста М. Ю. [5] наголошують на обмеженнях, зумовлених застарілою технікою, яку досі використовують у багатьох господарствах і яка вже не відповідає вимогам сучасного сільського господарства.

Загалом аналіз публікацій підтверджує актуальність питання створення в Україні національних аналогів сучасної техніки, адаптованої до умов українського агросектору. Експерти погоджуються, що розробка таких моделей могла б значно знизити виробничі витрати фермерів та допомогти агросектору вийти на новий рівень ефективності й незалежності.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – визначити ефективні шляхи впровадження автоматизації та роботизації машинно-тракторних агрегатів у землеробстві для оптимізації витрат на використання техніки, покращення контролю за агротехнічними роботами та забезпечення раціонального використання ґрунтових ресурсів в Україні.

Завдання дослідження:

- провести аналіз існуючих підходів до автоматизації та роботизації сільськогосподарської техніки;
- виявити основні проблеми, пов'язані з використанням імпоротної техніки в Україні, а також обмеження, що виникають через застаріле обладнання;
- визначити специфічні вимоги до українського машинно-тракторного парку, враховуючи умови агросектору України, для розробки національних аналогів сучасної техніки.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аграрний сектор по всьому світу переживає швидку трансформацію завдяки впровадженню автоматизації та роботизації, що суттєво впливає на підвищення ефективності виробництва і зниження витрат. В Україні, як і в багатьох інших країнах, розвиток новітніх технологій у сільському господарстві зумовлений потребою знизити залежність від фізичної праці та підвищити точність і продуктивність операцій. Світовий досвід демонструє, що автоматизація сільського господарства можлива завдяки техніко-технологічному прогресу: нові методи роботи дають змогу використовувати ресурси ощадливіше та отримувати кращі врожаї навіть на меншій кількості землі [1].

Україна – це країна з потужним аграрним сектором, який ще до початку повномасштабної війни обробляв колосальні 29 мільйонів гектарів посівних площ. Внутрішній ринок сільськогосподарської техніки постійно змінюється, залежачи від потреб і можливостей фермерів, і в різні роки сягає обсягів від \$2,2 до \$3,5 мільярда. На жаль, у 2022 році через повномасштабне вторгнення росії ринок агротехніки в Україні скоротився на 21%, опустившись до \$2,6 мільярда [6].

В Україні значні зміни на ринку сільськогосподарської техніки вимагають нових підходів до формування інженерно-технічного забезпечення. Вітчизняні та зарубіжні фахівці активно досліджують питання технологічного забезпечення аграрного виробництва, однак ця проблема залишається не повністю вивченою, і потребує особливої уваги у зв'язку зі зростанням технологічних вимог до аграрного сектору. За останні роки значно скоротилася кількість технічних засобів, доступних у сільському господарстві, що негативно впливає на продуктивність і економічну стабільність аграрного сектору [2].

Розвиток сучасного сільського господарства вимагає від техніки відповідності до нових стандартів екологічної безпеки, продуктивності та якості, а також економії ресурсів. Технічний розвиток забезпечується за рахунок енергоощадних технологій, які дозволяють поєднувати декілька

операцій в одному циклі, зменшувати підготовчий період і впроваджувати модульні агрегати для виконання різноманітних функцій. Зростання точності виконання агротехнічних операцій стало можливим завдяки новим ресурсозберігаючим і екологічно безпечним підходам, що враховують глибину обробки ґрунту, внесення добрив і точність посіву [3].

Інноваційна концепція розвитку агротехнологій спрямована на оптимізацію термінів виконання всіх операцій для отримання заданого врожаю високої якості. Важливе значення у цьому контексті має сучасний комплекс машин, здатних ефективно функціонувати у швидко змінних умовах. В умовах конкуренції на ринку технічних засобів зростає сегмент імпоротної нової та вживаної техніки, що підвищує ефективність агротехнологій, але також створює залежність від зарубіжних виробників. Ця залежність від імпоротної техніки загострює потребу в розвитку національних аналогів, які відповідають специфічним вимогам аграрного сектору України.

Таким чином, автоматизація і роботизація аграрного виробництва є невід'ємною складовою стратегії розвитку сільського господарства в Україні. Вони не тільки підвищують продуктивність і знижують виробничі витрати, але й забезпечують екологічну стійкість аграрного сектору. Національна агротехніка, яка враховуватиме місцеві умови та специфіку українського агросектору, може стати надійною основою для розвитку ефективного та конкурентоспроможного сільського господарства, що здатне не тільки забезпечити продовольчу безпеку, але й зміцнити економічний потенціал країни на міжнародному рівні.

Застарілий машинно-тракторний парк в Україні суттєво знижує ефективність сільського господарства, що послаблює позиції країни на аграрному ринку. Попри наявність власного потенціалу у виробництві сільськогосподарської техніки, аграрії здебільшого користуються старими машинами, які часто не відповідають сучасним вимогам. Недостатня кількість інвестицій у модернізацію технічного забезпечення та обмежений доступ до нових технологій призвели до того, що вартість основних засобів на гектар у порівнянні з європейськими країнами є критично низькою. Станом на початок 2023 року, цей показник становив лише 237 доларів США на гектар, що значно поступається, наприклад, Польщі (у 21,8 рази більше) чи Німеччині (майже у 100 разів більше). Це відставання в технологічному рівні призводить до низької продуктивності, зростання витрат на обслуговування техніки та збільшення собівартості вирощуваних культур [7].

Крім цього, в останні роки значна частка сільськогосподарської техніки оновлюється за рахунок імпортних агрегатів. Іноземні машини часто перевершують вітчизняні за надійністю, потужністю, рівнем комфорту та технологічністю, оскільки оснащені сучасними системами керування та економічними двигунами. Проте імпортна техніка також має недоліки в українських аграрних умовах. Зокрема, багато іноземних машин створені для великих європейських господарств, де інша структура ґрунтів і менша частка ручної праці, що в Україні ускладнює їх ефективне використання. Додатково, іноземне обладнання потребує висококваліфікованого технічного обслуговування та дорогих запасних частин, що часто призводить до подорожчання його експлуатації для українських фермерів. В результаті закупівля такої техніки хоча і забезпечує продуктивність, але значною мірою залежить від валютних коливань та змін в економічній ситуації.

Ще однією проблемою є нерівномірність розподілу техніки між різними категоріями господарств. Великі агропідприємства, які мають доступ до кредитних ресурсів, здатні придбати нову, часто імпортну техніку. У той же час особисті селянські господарства переважно користуються старими агрегатами або взагалі не мають власної техніки. За даними 2023 року, лише 21% домогосподарств у країні мають трактори, а комбайнами обладнані лише 1,5%. Така ситуація створює додатковий розрив у технологічному забезпеченні, оскільки малі фермери та домогосподарства, які складають значну частину українського аграрного сектора, не можуть забезпечити високу ефективність своїх виробничих процесів [8].

Скорочення виробництва власної сільськогосподарської техніки створює серйозні виклики для українських фермерів. За останні роки, з 2020 по 2023-й, випуск тракторів впав майже вчетверо (табл. 1). Це означає, що аграрії все більше покладаються на імпортну техніку, а це не лише підвищує витрати, але й робить Україну вразливою до змін у світовій економіці та валютних коливань. До того ж через втрату ключових ринків, таких як Росія, експорт української техніки значно скоротився, обмежуючи можливості збуту лише країнами СНД та деякими сусідніми державами. Але висока конкуренція та повільний темп технологічного прогресу у вітчизняному машинобудуванні не дозволяють повноцінно використовувати цей потенціал [9].

Таблиця 1 Динаміка виробництва, експорту та імпорту окремих видів сільськогосподарської техніки, шт.

Вид техніки	Показник	2020 р.	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2023 р. до 2020 р., %
Трактори з потужністю двигуна більше 59 кВт	виробництво	3297	2427	1389	829	25,1
	експорт	507	230	43	47	8,9
	імпорт	7734	7183	5729	6885	89,0
Косарки тракторні (навісні, причіпні)	виробництво	3595	1556	1110	525	14,6
	експорт	747	295	627	999	133,8
	імпорт	1417	1495	3533	4246	299,9
Розбризкувачі та розпилювачі (навісні, причіпні)	виробництво	1326	1300	1060	1346	101,5
	експорт	448	528	926	1136	254,3
	імпорт	1512	445	351	280	18,4

Джерело: складено автором на основі [8-10]

Отже, Україні терміново потрібне оновлення машинно-тракторного парку, і це не лише питання підвищення ефективності землеробства – це питання майбутнього. Відродження виробництва сільгосптехніки, розробка машин, адаптованих до українських умов, а також підтримка дрібних господарств є тими кроками, які можуть вивести галузь на новий рівень. Крім того, розширення ринків збуту за кордоном допоможе українській техніці стати конкурентоспроможною на міжнародній арені. Ці зміни не лише знизять залежність від імпортової техніки, але й дадуть імпульс для сталого розвитку сільського господарства України, відкриваючи нові перспективи для фермерів та забезпечуючи продовольчу безпеку країни [11].

Ефективне землеробство в Україні вимагає сучасного підходу до використання машинно-тракторних агрегатів. Ці вимоги охоплюють як технологічні аспекти, так і адаптацію техніки до українських агрокліматичних умов та сучасних стандартів, що підтримують підвищення врожайності та збереження екологічної стабільності ґрунтів. В умовах війни, що призвела до втрати понад 181 тисяч одиниць сільгосптехніки на суму 5,8 млрд доларів, критично важливо використовувати інноваційні розробки, які здатні мінімізувати ризики та підвищити ефективність роботи агросектору [Мирончук].

Сільськогосподарська техніка має відповідати таким технічним вимогам, як висока потужність, надійність, маневровість, екологічність та економічна ефективність. До ключових аспектів також відносяться зниження енергозатрат, зменшення витрат пального та адаптивність до кліматичних змін. Одним із важливих критеріїв є технологічна сумісність з інноваційними рішеннями в агросекторі, зокрема, можливість інтеграції з системами точного землеробства, автоматичного управління та моніторингу, що дозволяють аграріям здійснювати контроль над процесами та знижувати ймовірність втрат [12].

Вимоги до функціональності машинно-тракторних агрегатів включають їхню здатність працювати за технологіями Mini-Till, No-Till, Strip-Till, що дозволяють оптимально підготувати ґрунт без зайвого його пошкодження та зберегти його природну структуру. Агрегати мають бути пристосовані для роботи з різноманітними культурами, мати змінні сошники та варіативність налаштувань, щоб відповідати сучасним вимогам до точності та ефективності посіву і обробки ґрунту. Крім того, важливими є здатність до зміни висіву, легке налаштування норми внесення добрив та високий рівень контролю за витратою ресурсів.

Попри труднощі, українські виробники продовжують розробляти нові моделі, які відповідають цим вимогам. Вітчизняні заводи вже представили ряд новинок, що свідчить про здатність українського бізнесу підтримувати інноваційний потенціал, навіть в умовах масштабної війни. Наприклад, гібридний комбайн EZY LIFT Xtra EL1500 від компанії «Технолоджі Україна» став першою машиною на українському ринку, здатною збирати як картоплю, так і цибулю, забезпечуючи аграріям високу продуктивність. Житомирська компанія А.ТОМ створила потужний перетрушувач компосту 5300 з робочою шириною 5,3 метри та новий наповнювач біг-бегів, який з автоматичною системою точного наповнення значно полегшує процеси дозування.

Інші інновації включають електротрактор Kolos-244 від ElectroAgroTechnic, що працює на електродвигуні та є економічним в обслуговуванні. Така техніка суттєво знижує витрати на паливе та сприяє збереженню навколишнього середовища, що є вкрай важливим аспектом для стійкого розвитку агросектору України. Також компанія «Ремсинтез» представила дві нові сівалки «Січ Pro» і «Церера» 8 Mini-Till LUX, які відповідають вимогам сучасних методик обробки ґрунту та відзначаються значною функціональною гнучкістю.

Основною перевагою української сільськогосподарської техніки є висока якість при доступній ціні. Українські виробники ретельно відстежують світові тенденції в агротехніці, впроваджують сучасні розробки та адаптують існуючі моделі під новітні технології. Це дозволяє пропонувати продукцію з оптимальним співвідношенням ціни та якості.

Завдяки відносно низьким витратам на оплату праці в Україні собівартість виробництва зберігається на конкурентному рівні. Однак через загострення кризи на ринку праці та зростаючий дефіцит кадрів можливе підвищення заробітних плат, що може вплинути на собівартість техніки. При цьому якість залишається критично важливою для споживачів, особливо на міжнародних ринках, де українська техніка приваблива для невеликих фермерських господарств – основи агробізнесу в Європі.

Для підтримки розвитку галузі аграрного машинобудування експерти рекомендують такі заходи [13]:

- відновлення програми компенсації 25% вартості для сільгосптехніки та обладнання вітчизняного виробництва. Це підвищить конкурентоспроможність української техніки та стимулюватиме попит на неї серед місцевих споживачів;

- компенсація витрат на участь у міжнародних виставках. Такі виставки є важливим каналом для просування української техніки за кордон, проте їх вартість становить 80–100 тисяч євро. Бренди, що мають власний стенд, привертають більше уваги та мають кращі шанси на експорт. Компенсація витрат на участь у міжнародних виставках – поширена практика в багатьох країнах, і її впровадження допоможе українським виробникам активно виходити на міжнародні ринки.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дане дослідження, присвячене впровадженню автоматизації та роботизації в землеробстві, продемонструвало вагомі переваги цих підходів у зменшенні витрат і збереженні якості ґрунтів. Порівняно з результатами, отриманими іншими науковцями [3-5], наші висновки підтверджують загальну тенденцію до підвищення ефективності завдяки впровадженню сучасних технологій.

Зокрема, дослідження Пивовар П.В., Шлапак М.А. [2] акцентує на обмеженнях автоматизації в умовах складного рельєфу. Ми виявили, що ці обмеження можна частково подолати завдяки впровадженню гібридних систем, які поєднують автоматизацію з контролем операторів у критичних зонах.

Таким чином, наші висновки не лише підтверджують ефективність автоматизації в аграрному секторі, а й пропонують нові підходи до адаптації цих технологій у різних умовах. Інновації, такі як інтелектуальні датчики для моніторингу стану ґрунту та інтеграція з геоінформаційними системами, забезпечують ще більший потенціал для зниження витрат і збереження екосистеми.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження можна зробити кілька ключових висновків. Сучасні підходи до автоматизації та роботизації сільськогосподарської техніки вже демонструють високий потенціал для оптимізації аграрного виробництва. Проте, імпортна техніка в умовах України стикається з певними труднощами: відчувається нестача доступу до сервісних центрів, технічна підтримка часто обмежена, а запасні частини – дорогі. Це, в поєднанні з проблемами, пов'язаними із застарілим обладнанням, наявним у багатьох господарствах, створює додаткові труднощі для фермерів.

Щоб український аграрний сектор міг користуватися всіма перевагами сучасних технологій, необхідно розробити національні аналоги техніки, які б відповідали специфічним умовам нашої країни. Особливості клімату, структури ґрунтів і особливі вимоги до продуктивності вимагають адаптованих рішень. Тому створення українського машинно-тракторного парку, що поєднує сучасні технології з локальною адаптацією, може стати основою для подальшого розвитку агротехнічного потенціалу країни.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Саржанов О.А., Таценко О.В. Підходи щодо обґрунтування технічного забезпечення в сучасних технологіях виробництва сільськогосподарської продукції. Технології XXI століття: збірник тез по матеріалах 21-ої міжнародної наукової конференції, (8-10 вересня 2015 р.). Сумський національний аграрний університет. Суми: СНАУ, 2015. Ч. 1. С. 36-41. URL: <http://repo.sau.sumy.ua/handle/123456789/2965> (дата звернення: 11.11.2024).
2. Пивовар П.В., Шлапак М.А. Техніко-технологічне забезпечення діяльності сільськогосподарських підприємств на засадах асоціативної взаємодії: методичний підхід. Проблеми економіки. 2017. № 4. С. 331-318. URL: https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2017-4_0-pages-311_318.pdf (дата звернення: 11.11.2024).
3. Русан В. Жураковська Л. Аграрний сектор України у 2023 році: складові стійкості, проблеми та перспективні завдання. Національний інститут стратегічних досліджень. 2023. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/ahraryy-sektor-ukrayiny-u-2023-rotsi-skladovi-stiykosti-problemy-ta> (дата звернення: 11.11.2024).
4. Захарчук О.В., Навроцький Я.Ф., Вишневецька О.В. Сучасний стан та перспективи матеріально-технічного забезпечення сільського господарства. Економіка АПК. 2021. №6. DOI: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202106079> (дата звернення: 11.11.2024).
5. Сітковська А.О., Савенко О.А., Капуста М.Ю. Технічне забезпечення аграрних підприємств як фактор підвищення конкурентоспроможності. Агросвіт. 2022. №1. С. 53-67. DOI: 10.32702/2306&6792.2022.1.53 (дата звернення: 11.11.2024).
6. Соколов О., Гвоздьова О. Виробництво сільськогосподарської техніки в Україні: сьогодення та потенціал. delo.ua. 2024. URL: <https://delo.ua/agro/virobnictvo-silskogospodarskoyi-tehniki-v-ukrayini-syogodennya-ta-potencial-429311/> (дата звернення: 11.11.2024).
7. Tripti Singh. 3 Important Capital Assets Required in a Farm. URL: <https://www.businessmanagementideas.com/farms/3-important-capital-assets-required-in-a-farm/5685> (дата звернення: 11.11.2024).
8. Виробництво промислової продукції за видами. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 11.11.2024).
9. Державна митна служба України: веб-сайт. URL: <https://customs.gov.ua/> (дата звернення: 11.11.2024).
10. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 11.11.2024).
11. Мирончук І. Made in Ukraine: ТОП-новинок сільгосптехніки від українських виробників. Traktorist.ua. 2024. URL: <https://traktorist.ua/articles/made-in-ukraine-top-novinok-silgosptehniki-vid-ukrayinskih-virobnikiv> (дата звернення: 11.11.2024).
12. Iakomi K., Popescu O.A New Concept for Seed Precision Planting/ Agriculture and methods of agricultural science, 2015. Vol. 6, p. 38-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.035> (дата звернення: 11.11.2024).
13. Ринок сільськогосподарської техніки України: сучасний стан та перспективи розвитку – Pro-Consulting Pro-Consulting. 2023. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-selskohozyajstvennoj-tehniki-ukrainy-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya> (дата звернення: 11.11.2024).

REFERENCES

1. Sarzhanov, O.A., Tatsenko, O.V. (2015). Pidkhody shchodo obgruntuvannia tekhnichnoho zabezpechennia v suchasnykh tekhnolohiiakh vyrobnytstva silskohospodarskoi produktsii. Tekhnolohii KhKhI stolittia: zbirnyk tez po materialakh 21-oi mizhnarodnoi naukovoï konferentsii. Sumskyi natsionalnyi ahraryi universytet. Sumy: SNAU, 1. 36-41. <http://repo.sau.sumy.ua/handle/123456789/2965>.
2. Pyvovar, P.V., Shlapak, M.A. (2017). Tekhniko-tekhnolohichne zabezpechennia diialnosti silskohospodarskykh pidpriemstv na zasadaakh asotsiatsiinoï vzaiemodii: metodychnyi pidkhid. Problemy ekonomiky. 4. 331-318. URL: https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2017-4_0-pages-311_318.pdf.
3. Rusan, V. (2023). Zhurakovska L. Ahraryi sektor Ukrainy u 2023 rotsi: skladovi stiïkosti, problemy ta perspektyvni zavdannia. Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/ahraryy-sektor-ukrayiny-u-2023-rotsi-skladovi-stiykosti-problemy-ta>.
4. Zakharchuk, O.V., Navrotskyi, Ya.F., Vyshnevetska, O.V. (2021). Suchasnyi stan ta perspektyvy materialno-tekhnichnoho zabezpechennia silskoho hospodarstva. Ekonomika APK. 6. DOI: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202106079>.

5. Sitkovska, A.O., Savenko, O.A., Kapusta, M.Iu. Tekhnichne zabezpechennia ahrarykh pidpriemstv yak faktor pidvyshchennia konkurentospromozhnosti. Ahrosvit. 2022. 1. 53-67. DOI: 10.32702/2306&6792.2022.1.53.

6. Sokolov, O., Hvozdoва, O. (2024). Vyrobnystvo silskohospodarskoi tekhniki v Ukraini: sohodennia ta potentsial. delo.ua. 2024. URL: <https://delo.ua/agro/virobnictvo-silskogospodarskoyi-tekhniki-v-ukrayini-syogodennia-ta-potencial-429311/>.

7. Tripti Singh. 3 Important Capital Assets Required in a Farm. URL: <https://www.businessmanagementideas.com/farms/3-important-capital-assets-required-in-a-farm/5685>.

8. Vyrobnystvo promyslovoi produktsii za vydamy. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.

9. Derzhavna mytna sluzhba Ukrainy: veb-sait. URL: <https://customs.gov.ua/>.

10. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.

11. Myronchuk, I. (2024). Made in Ukraine: TOP-novynok silhospstekhniki vid ukrainskykh vyrobnykiv. Traktorist.ua. URL: <https://traktorist.ua/articles/made-in-ukraine-top-novinok-silgospstekhniki-vid-ukrayinskih-virobnikiv>.

12. Iakomi, K., Popescu, O. (2015). A New Concept for Seed Precision Planting/ Agriculture and methods of agricultural science, 6, 38-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.035>.

13. Rynok silskohospodarskoi tekhniki Ukrainy: suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku – Pro-Consulting. Pro-Consulting. 2023. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-selskohozyajstvennoj-tehniki-ukrainy-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya>.

Y. Petriuk, O. Artyukh. Innovative approaches to agriculture: automation and robotisation of machine tractor units for optimization of costs and conservation of soils

The modern agricultural sector of Ukraine needs equipment that will meet the requirements of precision farming and work effectively in specific conditions. The problems associated with outdated equipment and the high cost of imported equipment encourage the search for new solutions to create competitive Ukrainian products. Traditional methods of land cultivation are no longer able to meet the requirements of modern agricultural production, therefore automation and robotization of machine-tractor units are becoming necessary to optimize costs and preserve soil fertility.

The purpose of this study is to analyze modern approaches to automation and robotization of agricultural machinery, as well as to determine the possibilities of their implementation in domestic production.

To achieve this goal, the methods of analysis of literary sources, comparison of existing models of technology, as well as the method of expert evaluation were applied. Special attention is paid to the study of the results of previous research on the automation and robotization of agricultural equipment in order to determine the most promising directions for adaptation in Ukraine.

The results showed that there is a significant potential for the development of Ukrainian agricultural machinery focused on automation. The implementation of modern management technologies, including robotic systems and navigation, can significantly increase productivity, reduce costs and improve adaptability to agricultural production conditions. According to the conclusions, the introduction of technological innovations in the production of Ukrainian agricultural machinery will open the way to increasing the competitiveness of the industry. This will allow farmers to get modern and affordable equipment that will meet the high requirements of agribusiness.

Key words: agricultural machinery, technical and technological support, productivity, economic effect, cost optimization, preservation of soil fertility.

ПЕТРЮК Юрій Іванович, аспірант кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний університет «Запорізька політехніка» e-mail: petriuk.phd@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4543-1744>

АРТЮХ Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний університет «Запорізька політехніка» e-mail: artjukh@zp.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5043-7038>

Yurii PETRIUK, postgraduate student of Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», e-mail: petriuk.phd@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4543-1744>

Olexander ARTYUKH, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University «Zaporizhzhia Polytechnic» e-mail: artjukh@zp.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5043-7038>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1741

Приходько В.Е.
Національний університет «Львівська політехніка»

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНИХ АВТОПОЇЗДІВ ДЛЯ МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У роботі запропоновано оригінальну процедуру моделювання та вдосконалену методику статистичного оцінювання параметрів, що характеризують ефективність функціонування енергетичної системи “двигун – трансмісія” сучасних автопоїздів **Volvo FM** і **Freightliner Cascadia**, які виконують міжнародні вантажні перевезення із застосуванням дизельних двигунів Volvo D13 і Detroit DD15. Методика побудована з урахуванням актуальних міжнародних нормативних вимог до транспортування вантажів, зокрема щодо екологічності, паливної ефективності, стабільності технічних характеристик і економічності доцільності перевезень.

Оцінювання ефективності системи “двигун – трансмісія” базується на комплексному аналізі факторів впливу, що дозволяє глибше дослідити взаємозв'язок між параметрами роботи транспортного засобу та витратами енергії під час експлуатації на міжнародних маршрутах. Для цього використано метод аналітичної ієрархії та адаптовані статистичні інструменти, що забезпечують обґрунтованість висновків і придатність методики до практичного застосування. Особливу увагу приділено ідентифікації найбільш значущих факторів, які впливають на загальну енергоефективність автопоїздів.

Теоретичну основу дослідження склали праці провідних вчених у галузі транспортних технологій і логістики, серед яких: Ігор Вікович, Володимир Волков, Петро Гашук, Георгій Прокудін, Анатолій Лебедев, Ігор Мурований, Володимир Сахно, Михайло Подригало, Рамазан Хабутдінов та ін. Запропоновані результати можуть бути корисними для підвищення ефективності міжнародних вантажних перевезень, зниження витрат пального та вдосконалення технічної політики автотранспортних підприємств.

Ключові слова: автопоїзд, дизельний двигун, трансмісія, енергоефективність, міжнародні перевезення, вантажі, метод аналітичної ієрархії.

ВСТУП

Однією з основних задач логістичного забезпечення міжнародних автомобільних перевезень є вибір виду транспорту, розробка маршруту руху, вибір рухомого складу, підготовка вантажів до перевезення, документальне забезпечення на усіх етапах доставки, контроль за якістю сервісу та дотриманням регламенту виконання робіт тощо [1]. На сучасному етапі розвитку світового ринку автотранспортних засобів (АТЗ), зокрема автопоїздів для міжнародних, зростає різноманіття запропонованих видів та різновидів їх конструкцій. Тому при обґрунтуванні або оновленні парку рухомого складу підприємства, які здійснюють міжнародні перевезення вантажів автопоїздами, перевізники можуть висувати до вибору автопоїздів вимоги щодо їх ефективності. Проте, на сьогодні немає комплексного підходу щодо енергетичної оцінки ефективності сучасних автопоїздів, які здійснюють міжнародні перевезення вантажів.

Найскладнішим і найважливішим агрегатом, від стану якого залежать багато технічних і економічних показників функціонування автопоїздів, є двигун.

Розрізняють детерміновані, статистичні (стохастичні), імітаційні та експертно-функціональні моделі системи системи “двигун – трансмісія”.

Детерміновані математичні моделі дизельного двигуна автопоїзда як джерела механічної енергії базуються на системах диференціальних рівнянь, що враховують термодинамічні, механічні та гідравлічні процеси [2]. Наприклад, математична модель двигуна як джерела механічної енергії має такий загальний вигляд [3]:

$$\frac{d\omega_{\varepsilon}}{dt} = f_1(M_{\varepsilon}, M_{mp}) \quad (1)$$

$$\frac{dg_{\varepsilon}}{dt} = f_2(M_{\varepsilon}, M_{mp}) \quad (2)$$

де M_{ε} – ефективний крутний момент від газів двигуна, що є функцією кутової швидкості валу, подачі палива та часу; M_{mp} – момент опору трансмісії, що не залежить від двигуна.

Для дослідження динаміки руху автопоїзда можна застосувати таку математичну модель:

$$J_d \frac{d\omega_{\varepsilon}}{dt} = M_{\varepsilon} - M_{mp} \quad (3)$$

J_d - зведений момент інерції двигуна [3].

У цій моделі момент опору трансмісії $M_{тр}$ визначається аналітично або експериментально як функція параметрів трансмісії, рушія та опорної поверхні, що змінюється в часі. Ефективний момент двигуна M_e є функцією параметрів самого двигуна та параметра керування подачею палива α_k :

$$M_e = \Phi_3(\omega_e, \alpha_k, t)$$

Однак, системи диференціальних рівнянь (1-3) задовільно описують лише якісну картину характеристик розв'язків диференціальних рівнянь, що недостатньо для визначення ефективності функціонування системи "двигун-трансмісія".

Функціонування системи "двигун-трансмісія" дизельного автопоїзда можна також характеризувати випадковими процесами (наприклад, випадкові коливання крутного моменту, швидкості, навантаження), записавши інтегральні рівняння випадкових процесів у вигляді лінійних інтегральних рівнянь Фредгольма.

Позначимо:

$Q(t)$ — випадковий процес теплової енергії, що утворюється в дизельному двигуні в часі t ,

$M(t)$ — випадковий процес механічної енергії, що передається на трансмісію,

$T(t)$ — випадковий процес механічної енергії, що подається на півосі коліс.

Тоді загальна схема перетворення теплової енергії у механічну та передачі її трансмісією може бути описана інтегральними рівняннями виду:

$$M(t) = \int_0^t K_1(t, \tau) Q(\tau) d\tau + \eta_1(t)$$

$$T(t) = \int_0^t K_2(t, \tau) M(\tau) d\tau + \eta_2(t)$$

де: $K_1(t, \tau)$, $K_2(t, \tau)$ — інтегральні ядра, що характеризують динаміку перетворення енергії в двигуні та трансмісії відповідно,

- $\eta_1(t)$, $\eta_2(t)$ — випадкові шумові процеси, що моделюють флуктуації та невизначеності у процесах перетворення і передачі енергії.

Фактори, що визначають ці процеси - перетворення теплової енергії у механічну і передачу механічної енергії трансмісією до рушія автопоїзда.

Перетворення теплової енергії у механічну: температурний режим камери згоряння; якість палива та режим його подачі; тиск і об'єм робочої суміші; теплопровідність і тепловіддача деталей двигуна; вібрації та механічні коливання деталей двигуна; випадкові флуктуації процесу згоряння (нестабільність горіння).

Передачу механічної енергії трансмісією до рушія автопоїзда: механічні втрати на тертя; динамічні навантаження та удари; еластичність та деформації деталей трансмісії; знос і технічний стан вузлів трансмісії; випадкові коливання навантаження на колеса.

Комбінації факторів, що характеризують випадкові процеси "двигун-трансмісія": комбінація температурних коливань і нестабільності згоряння визначає випадкові флуктуації теплової енергії $Q(t)$; взаємодія механічних коливань двигуна і динамічних навантажень трансмісії формує випадковий процес $M(t)$; залежність між зносом трансмісії і змінними навантаженнями на колеса визначає випадковий процес $T(t)$.

Можна також використовувати інтегро-диференціальні рівняння випадкових процесів у вигляді лінійних інтегральних рівнянь Фредгольма або Вольтерри. Переваги використання інтегро-диференціальних рівнянь для моделювання систем "двигун-трансмісія" полягають у такому:

- інтегральні члени в рівняннях дають змогу враховувати вплив попередніх станів системи на поточний стан, що важливо для опису складної взаємодії між двигуном і трансмісією;
- інтегро-диференціальні рівняння дають змогу описувати як миттєві зміни (через похідні), так і накопичені ефекти (через інтеграли), що характерно для реальних технічних систем;
- такі рівняння легко розширюються до стохастичних моделей, що дозволяє моделювати випадкові процеси, властиві роботі двигуна і трансмісії в реальних умовах експлуатації;
- завдяки комплексному опису динаміки системи інтегро-диференціальні рівняння забезпечують більш точніше прогнозування поведінки системи при різних режимах роботи.

Незважаючи на те, що інтегро-диференціальні рівняння є потужним інструментом для комплексного і точного моделювання систем "двигун-трансмісія", який враховує як динамічні, так і

стохастичні аспекти їх роботи, застосування їх пов'язане з великою кількістю складних експериментів, неспівмірною із задекларованою у статті проблемою.

Для аналізу енергоефективності автопоїздів рекомендуються імітаційні моделі в середовищах типу MATLAB Simulink, які інтегрують динамічні рівняння двигуна, трансмісії та зовнішніх умов.

Імітаційна модель дизельного двигуна на основі фізичних, напівфізичних, математичних та термодинамічних рівнянь дає змогу проводити прогнозне моделювання функціонування двигуна [4].

Уся система двигуна розділена на кілька функціональних блоків: охолодження, змащення, утворення паливноповітряної суміші, впорскування, згоряння та викиди. Підмоделі та динамічні характеристики окремих блоків встановлюються за принципами роботи двигуна, рівняннями та експериментальними даними, зібраними на стенді випробувань дизельних та бензинових двигунів. Загальна динаміка системи двигуна внутрішнього згоряння виражається у вигляді набору одночасних алгебраїчних і диференціальних рівнянь з використанням підблоків і S-функцій Matlab/Simulink. Моделювання цієї моделі, реалізоване на Matlab/Simulink, може бути використане для отримання продуктивності роботи двигуна, тиску, температури, ефективності, виділення тепла, кута кривошипа, швидкості витрати палива, викидів на різних підблоках. Однак, для досягнення цілей статті, процес визначення ефективності автопоїзда є також дуже складний.

На нашу думку, оцінювання енергоефективності системи “двигун – трансмісія” сучасних дизельних автопоїздів достатньо провести, використавши експертно-функціональну модель дослідження процесу функціонування цієї системи.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Серед відомих системно описаних підходів оцінювання автомобілів та автопоїздів, що можуть використовуватися при виконанні міжнародних вантажних перевезень виділяють підходи що відповідають критеріям енергоефективності [5, 6, 7].

У кандидатській дисертації [7] Гальона І. І. сформулювала та розв'язала задачу, яка полягала у розробці, адаптації та застосуванні експлуатаційно-технологічного підходу, який би забезпечив енергозберігаючі технології при обґрунтуванні автомобіля на задані умови експлуатації. Даний підхід базувався на принципах теорії енергоресурсної ефективності автомобіля узагальненого типу, що розроблена в працях проф. Хабутдінова Р.А. [5, 6]. Для оцінки автомобіля як носія технічних ресурсів транспорту у цій теорії використовувалися:

- енергетична схема перетворення технологічних ресурсів транспорту в фізичний продукт;
- технологічна схема взаємозаміщення багатофункціонального автотранспортного засобу (АТЗ) як носія автономних технічних ресурсів транспорту (АНРТ) у транспортній операції;
- математичні моделі для аналізу енергоресурсної ефективності узагальненого типу (зі змінною структурно-параметричною організацією).

У теорії енергоресурсної ефективності розглядався автомобіль як носій технічних ресурсів транспорту, що має вісім властивостей. Головними властивостями, які мають важливе значення для виконання транспортних операцій та забезпечення адаптивного функціонування АТЗ є такі, як: складна машина, небезпечний об'єкт керування, перевізний засіб, знаряддя технологічних машинних впливів (машинні процедури) та конструктивно-технологічна основа процесу перетворення ресурсів.

В енергетичній схемі перетворення технологічних ресурсів транспорту у фізичний продукт, ресурси поділяються на технічні, енергетичні, трудові та фізичні.

При об'єднанні технологічних і режимних ресурсів отримуємо виробничі ресурси під час використання яких у процесі перетворення енергії формуються енерговитрати на переміщення експлуатаційної маси. Потім енерговитрати перетворюються у фізичний продукт, тобто керовані імпульси кількості руху автомобіля. Частина цих імпульсів являє собою транспортну роботу з перевезення вантажів.

У теорії енергоресурсної ефективності АТЗ нами враховувалися зміни технічних параметрів нових автомобілів на основі модульного підходу за схемою структурно-параметричної організації конструкції АТЗ.

У сукупності компоненти, які визначають енергоефективність дизельного автопоїзда система "двигун - трансмісія" є базовою, оскільки вона прямо впливає на перетворення енергії, визначає режими роботи в різних умовах руху, істотно впливає на витрати палива, визначає динаміку та швидкість автопоїзда.

Прямий вплив на перетворення енергії реалізовується тим, що дизельний двигун перетворює хімічну енергію палива в механічну, а трансмісія передає цю енергію на ведучі колеса автопоїзда. Ефективність кожного з цих процесів визначає кінцеву енергоефективність автопоїзда.

Визначення режиму роботи системи важливе тому, що оптимальний вибір передачі дозволяє двигуну працювати в зоні максимального ККД. Система "двигун - трансмісія" визначає, як ефективно використовується потужність двигуна в різних умовах руху автопоїзда.

Ключовий вплив на витрату палива пояснюється тим, що характеристики двигуна (питома витрата палива, крутний момент) та ефективність трансмісії безпосередньо впливають на обсяг спожитого палива.

Співвідношення крутного моменту і швидкості руху автопоїзда, що забезпечується трансмісією, визначає розгінні характеристики та можливість підтримувати оптимальну швидкість руху, тобто, система визначає динаміку та швидкість руху автопоїзда.

Загалом система "двигун - трансмісія" визначає поведінку функціонування автопоїзда:

- ведучих коліс (швидкість обертання, крутний момент, тягові зусилля автопоїзда).
 - трансмісійного валу (карданного валу/півосей): навантаження, швидкість обертання, крутний момент.
 - головної передачі та диференціалу: передавальне число, розподіл крутного моменту.
- Важливо відмітити, що система "двигун - трансмісія" також впливає на:
- зношення шин (залежить від режиму розгону та гальмування).
 - ресурс гальмівної системи (моторне гальмування розвантажує гальма).
 - комфорт водія (зручність управління, шум, вібрація).

Ефективність системи "двигун-трансмісія" вивчалась багатьма дослідниками, які зробили відповідний внесок в оптимізацію управління енергією в автомобілях, що включає ефективне використання двигуна та трансмісії. Також, значний внесок зробили інженери та науковці компаній Volvo та Freightliner, постійно вдосконалюючи свої системи "двигун-трансмісія" для досягнення більшої ефективності та економії палива.

У доступних нам публікаціях використовувались декілька методів щодо прийняття управлінського рішення з вибору ефективного автомобіля. Аналіз багатофакторних критеріїв та зведення багатофакторної задачі до однофакторної здійснювалися такими методами:

– метод матричного моделювання [8], де чинники процесу перевезення упорядковуються у матричному вигляді, що дозволяє подати взаємозв'язки між ресурсами та витратами у вигляді блоків матриці. Під інтегральним коефіцієнтом ефективності запропоновано розуміти число, яке дорівнює середньому геометричному від блочних коефіцієнтів;

– метод використання вагових коефіцієнтів [9,10], де

використання вагових коефіцієнтів у логістичних процесах широко застосовується для оцінки різних факторів, таких як витрати палива, час доставки вантажів та надійність перевезень.

У роботах з логістичної оптимізації вагові коефіцієнти використовуються для визначення важливості кожного критерію при багатокритеріальній оцінці ефективності перевезень. Наприклад, у працях [11,12, 19] про визначення ефективних технологічних процесів перевезень автотранспортом розглядаються такі параметри, як витрати на транспортування, собівартість підготовки вантажу та інші витрати, пов'язані з перевезенням. Сучасні модифікації методу вагових коефіцієнтів включають:

- 1.аналіз експертних оцінок для визначення вагових коефіцієнтів, що впливають на ефективність перевезень;
- 2.розробку математичних моделей, які включають вагові коефіцієнти для оптимізації маршрутів та вибору транспорту;
- 3.інтеграцію із системами управління якістю, де вагові коефіцієнти використовуються для оцінки ризиків та якості доставки. Обмеження цього методу пов'язані з суб'єктивністю вибору вагових коефіцієнтів, проте використання експертних оцінок та статистичного аналізу допомагає підвищити об'єктивність оцінок.

- метод ранжування[11].

Суть методу ранжування для визначення ефективності міжнародних вантажних перевезень полягає у порівнянні та ранжуванні різних критеріїв, які впливають на ефективність цих перевезень. Основні кроки цього методу включають:

Визначення критеріїв: вибір ключових показників, таких як витрати, час доставки, надійність транспортування, безпека тощо.

- 1.Оцінка критеріїв: кожний критерій оцінюється за певними параметрами, наприклад, за шкалою від 1 до 10.

2. Ранжування критеріїв: критерії ранжуються за їхньою важливістю або впливом на загальну ефективність перевезень.
3. Визначення пріоритетності: на основі ранжування визначаються пріоритети для оптимізації логістичних процесів.
4. Оптимізація процесів: використання результатів ранжування для вдосконалення маршрутів, вибору транспорту та інших аспектів перевезень.

Цей метод ранжування дозволяє логістичним компаніям швидко ідентифікувати слабкі місця та сфокусуватися на найбільш важливих аспектах для підвищення ефективності міжнародних вантажних перевезень.

– (метод бального оцінювання) [12].

Суть методу бального оцінювання для визначення ефективності міжнародних вантажних перевезень полягає у присвоєнні балів різним критеріям, які впливають на ефективність цих перевезень. Основні кроки цього методу включають:

1. Визначення критеріїв для вибору ключових показників, таких як витрати, час доставки, надійність транспортування, безпека тощо.
2. Присвоєння балів, де кожному критерію присвоюється певна кількість балів залежно від його важливості та виконання вимог.
3. Сумарна оцінка, яка включає сумування балів за усіма критеріями для отримання загальної оцінки ефективності перевезень.
4. Порівняння варіантів: за різними їхніми загальними оцінками для визначення найефективнішого з них.

Цей метод бального оцінювання для визначення ефективності дає змогу логістичним компаніям швидко ідентифікувати найкращі варіанти перевезень та сфокусуватися на вдосконаленні тих аспектів, які мають найбільший вплив на загальну ефективність міжнародних вантажних перевезень.

– інтегруванням вимірних показників ефективності є одним із відомих способів, наприклад «радара» або, (що те саме) «профілів», в один числовий показник без «зважування» [10].

Радарна діаграма - це діаграма та/або графік у площині, що складається з послідовності рівновеликих кутів, які утворюються відрізками, що виходять з однієї точки. Довжина кожного відрізка пропорційна значенню одного з чинників ефективності перевезення. Легко обчислити площу многокутника, утвореного кінцями усіх відрізків. Цю площу можна прийняти за інтегральний коефіцієнт ефективності.

Аналіз праць показує, що перелік чинників, які впливають на ефективність транспортування вантажів залежить від доволі великої кількості чинників, причому багато простих чинників впливають на значення декількох узагальнених показників. Це може призводити до багатократного їх врахування в узагальнених показниках та необґрунтованого збільшення значень ефективності. Необхідність підвищення енергетичної ефективності автопоїздів шляхом вдосконалення методів проєктування за рахунок застосування нових показників та критеріїв наведена у статті [12].

Питання енергетичної ефективності роботи АТЗ розглядалися також для вдосконалення процесу планування перевезення вантажів автомобільним транспортом [13], у теорії автомобіля, динаміки автомобіля, теорії руху автомобіля та багатоланкових автопоїздів [14-16].

Наведений огляд і аналіз цих праць дає змогу зробити висновок, що задача розроблення науково обґрунтованих інтегральних критеріїв для вибору автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень ускладнюється з розвитком сучасних технологій і залишається актуальною у наукових дослідженнях.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз впливу чинників енергоефективності системи “дизельний двигун – трансмісія” на інтегральний показник ефективності за умов технологічних досягнень впродовж останніх років у ЄС та розроблення методології розрахунку інтегрального показника техніко-технологічної ефективності АТЗ для міжнародних вантажних автомобільних перевезень. Для досягнення цієї мети слід розробити алгоритм обчислення інтегрального показника ефективності, використавши метод аналітичної ієрархії Т. Сааті [17,18].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Енергоефективність автопоїзда
2. Енергетична ефективність автопоїзда — це міра того, наскільки перевезення ним оптимізовані щодо використання енергетичних ресурсів та зниження витрат на паливо.
3. Для визначення енергетичної ефективності автопоїзда слід враховувати такі фактори:

4. Тип двигуна та його ефективність.
5. Вантажопідйомність та рівень завантаження.
6. Шини та їхній оптимальний тиск.
7. Аеродинамічні властивості автопоїздів.
8. Стиль водіння та поведінка водіїв.
9. Технічний стан автопоїздів та їхнє обслуговування.
10. Вплив кліматичних умов та рельєфу.

Експертно-функціональна модель інтегрального показника ефективності дизельного двигуна E для автопоїзда під час міжнародних вантажних автомобільних перевезень може бути представлена у такому вигляді:

$$E = w_1 \cdot \frac{T}{m} + w_2 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - w_3 \cdot \alpha \quad (4)$$

де: T — крутний момент (Н·м), m — маса двигуна (кг), I — момент інерції (кг·м²),
 ω — кутова швидкість (рад/с), α — кутове пришвидшення (рад/с²), η — ККД (безрозмірний),
 w_1, w_2, w_3 — вагові коефіцієнти, що відображають значущість кожного параметра.

Пояснення формули (4):

1. Відношення крутного моменту до маси (T/m) — показує тягові можливості двигуна на одиницю маси, що є важливим для динаміки автопоїзда.
2. Відношення добутку ККД та кутової швидкості до моменту інерції ($\frac{\eta \cdot \omega}{I}$) — характеризує ефективність використання обертальної енергії та швидкість досягнення максимальної потужності.
3. Кутове пришвидшення зі знаком "мінус" ($-\alpha$) — відображає інерційність двигуна при зміні навантажень, оскільки високе пришвидшення може призвести до збільшення зносу та нестабільної роботи автопоїзда.

З урахуванням особливостей системи "дизельний двигун – трансмісія", експертно-функціональна модель інтегрального показника ефективності E може бути записана так:

$$E = w_1 \cdot \frac{T}{m} + w_2 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - w_3 \cdot \alpha + w_4 \cdot \eta_{\text{тр}} - w_5 \cdot L_{\text{тр}} \quad (5)$$

де: $\eta_{\text{тр}}$ — коефіцієнт корисної дії трансмісії (безрозмірний), $L_{\text{тр}}$ — сумарні втрати потужності в трансмісії (Вт або безрозмірна величина, що відображає відносні втрати),

w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 — вагові коефіцієнти, що відображають значущість кожного параметра.

Пояснення складових моделі (5):

$\frac{T}{m}$ — тягові можливості двигуна на одиницю маси, що впливає на динамічні характеристики автопоїзда.

$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$ — ефективність використання обертальної енергії двигуна та швидкість досягнення максимальної потужності.

$-\alpha$ — негативний вплив інерційності двигуна на стабільність роботи і його зношення.

$\eta_{\text{тр}}$ — ефективність передачі потужності від двигуна до коліс, що безпосередньо впливає на загальну енергоефективність автопоїзда.

$-L_{\text{тр}}$ — втрати в трансмісії, які знижують корисну потужність і динамічні характеристики.

Щоб визначити вагові коефіцієнти, застосуємо метод аналітичної ієрархії (MAI) Т. Сааті, [19,20].

Алгоритм MAI складається із сукупності наступних етапів:

1. Перший етап полягає в структуризації завдання у вигляді ієрархічної структури з декількома рівнями.

2. На другому етапі виконуються попарні порівняння елементів кожного рівня.

3. Обчислюються коефіцієнти ваги для елементів кожного рівня. При цьому виконується перевірка якості даних на узгодженість за допомогою визначення індексу узгодженості та відношення узгодженості матриці попарних порівнянь. Індекс узгодженості (CI):

$$CI = (\lambda_{\text{max}} - n) / (n - 1),$$

Відношення узгодженості (CR):

$$CR = CI / IO,$$

де: $IO = 1,12$ при розмірності матриці порівнянь $n = 5$. Матриця попарних порівнянь вважається добре узгодженою, якщо $CR \leq 0,1$ при $n \geq 5$

Застосування методу аналітичної ієрархії Т. Сааті для визначення вагових коефіцієнтів.

Крок 1: Структуризація ієрархії

Головна мета: визначити інтегральний показник ефективності системи "дизельний двигун – трансмісія".

Критерії (рівень 2):

1. $\frac{T}{m}$ (тягові можливості на одиницю маси).
2. $\frac{\eta \cdot \omega}{I}$ (ефективність використання обертальної енергії).
3. $-\alpha$ (негативний вплив інерційності).
4. η_{tr} (ККД трансмісії).
5. $-L_{tr}$ (втрати в трансмісії).

Крок 2: Попарне порівняння критеріїв

Побудова матриці попарних порівнянь (шкала від 1 до 9):

Критерій	$\frac{T}{m}$	$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$	$-\alpha$	η_{tr}	$-L_{tr}$
$\frac{T}{m}$	1	3	5	1	2
$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$	1/3	1	3	1/3	1
$-\alpha$	1/5	1/3	1	1/5	1/3
η_{tr}	1	3	5	1	2
$-L_{tr}$	1/2	1	3	1/2	1

Крок 3: Обчислення вагових коефіцієнтів

1. Нормалізація матриці (сума кожного стовпця):

Стовпець 1: $1+1/3+1/5+1+1/2=3.0331+1/3+1/5+1+1/2=3.033$.

Стовпець 2: $3+1+1/3+3+1=8.3333+1+1/3+3+1=8.333$.

Стовпець 3: $5+3+1+5+3=17.5+3+1+5+3=17$.

Стовпець 4: $1+1/3+1/5+1+1/2=3.0331+1/3+1/5+1+1/2=3.033$.

Стовпець 5: $2+1+1/3+2+1=6.3332+1+1/3+2+1=6.333$.

2. Нормалізована матриця (елементи поділені на суму стовпця):

Критерій	$\frac{T}{m}$	$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$	$-\alpha$	η_{tr}	$-L_{tr}$
$\frac{T}{m}$	0.329	0.360	0.294	0.329	0.316
$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$	0.109	0.120	0.176	0.109	0.158
$-\alpha$	0.066	0.040	0.059	0.066	0.053
η_{tr}	0.329	0.360	0.294	0.329	0.316
$-L_{tr}$	0.165	0.120	0.176	0.165	0.158

3. Середнє значення по рядках (вагові коефіцієнти):

$w_1=0.326, w_2=0.134, w_3=0.057, w_4=0.326, w_5=0.157$.

Крок 4: Перевірка узгодженості

Максимальне власне значення (λ_{max}): 5.046. Індекс узгодженості (CI): $(\lambda_{max} - n)/(n - 1) = 0.0115$.

Відношення узгодженості (CR): $CR = \frac{CI}{IO} = 0.0103$ (де $RI=1.12$ для $n = 5$). $CR < 0.10 \rightarrow$ матриця узгоджена.

Підсумок

Інтегральний показник ефективності:

$$E = 0.326 \cdot \frac{T}{m} + 0.134 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - 0.057 \cdot \alpha + 0.326 \cdot \eta_{tr} - 0.157 \cdot L_{tr}$$

де:

1. $\frac{T}{m}$ (тягові можливості на одиницю маси).
2. $\frac{\eta \cdot \omega}{I}$ (ефективність використання обертальної енергії).
3. $-\alpha$ (негативний вплив інерційності).
4. η_{tr} (ККД трансмісії).
5. $-L_{tr}$ (втрати в трансмісії).

Ця модель дає змогу комплексно оцінити ефективність системи, враховуючи ключові параметри двигуна та трансмісії.

Використані дані для порівняння.

Автопоїзд Volvo FM

Двигун: Volvo D13 (найбільш потужний варіант для порівняння).

Потужність: 500 к.с. = 368 кВт, Крутний момент: 2500 Н.м,

Оберти (максимального крутного моменту): 980-1270 об/хв (візьмемо середнє значення 1125 об/хв)

Трансмісія: I-Shift (автоматизована механічна коробка передач).

Маса двигуна (m): Приблизно 1000 кг (оцінка).

Момент інерції двигуна (I): Приблизно 0.8 кг·м² (оцінка).

ККД двигуна (η): 0.45 (для дизельних двигунів).

ККД трансмісії (η_{tr}): 0.90 (для автоматизованих механічних КПП).

Кутове прискорення (α): Нехай 20 рад/с² (оцінка).

Втрати в трансмісії (L_{tr}): 8% від потужності двигуна ($0.08 \cdot 368 \text{ кВт} = 29.44 \text{ кВт} = 29440 \text{ Вт}$).

Автопоїзд Freightliner Cascadia

Двигун: Detroit DD15 (найбільш потужний варіант для порівняння).

Потужність: 505 к.с. = 371 кВт

Крутний момент: 1850 lb-ft = 2508 Нм

Оберти (максимального крутного моменту): Приблизно 1200 об/хв

Трансмісія: Detroit DT12 (автоматизована механічна коробка передач).

Маса двигуна (m): Приблизно 1050 кг (оцінка).

Момент інерції двигуна (I): Приблизно 0.85 кг·м² (оцінка).

ККД двигуна (η): 0.45 (для дизельних двигунів).

ККД трансмісії (η_{tr}): 0.92 (для автоматизованих механічних КПП).

Кутове прискорення (α): Нехай 22 рад/с² (оцінка).

Втрати в трансмісії (L_{tr}): 7% від потужності двигуна ($0.07 \cdot 371 \text{ кВт} = 25.97 \text{ кВт} = 25970 \text{ Вт}$).

2. Розрахунок інтегрального показника

Автопоїзд Volvo FM: $\frac{T}{m} = 2500/1000 = 2.5$; $\omega = 2\pi \cdot 1125/60 \approx 117.8 \text{ рад/с}$; $\frac{\eta \cdot \omega}{I} = 0.45 \cdot 117.8/0.8 \approx 66.39$;

$E = 0.326 \cdot 2.5 + 0.134 \cdot 66.39 - 0.057 \cdot 20 + 0.326 \cdot 0.90 - 0.157 \cdot 29440/1000$;

$E \approx 0.326 \cdot 2.5 + 0.134 \cdot 66.39 - 0.057 \cdot 20 + 0.326 \cdot 0.90 - 0.157 \cdot 29440/1000 \approx$

$\approx 0.815 + 8.906 - 1.14 + 0.293 - 4.62 \approx 0.815 + 8.906 - 1.14 + 0.293 - 4.62 \approx 4.254$.

Автопоїзд Freightliner Cascadia: $\frac{T}{m} = 2508/1050 \approx 2.39$; $T = 1050/2508 \approx 2.39$;

$\omega = 2\pi \cdot 1200/60 \approx 125.7 \text{ рад/с}$; $\omega = 602\pi \cdot 1200 \approx 125.7 \text{ рад/с}$;

$\frac{\eta \cdot \omega}{I} = 0.45 \cdot 125.7/0.85 \approx 66.55$; $\eta \cdot \omega = 0.85 \cdot 125.7 \approx 66.55$; $E = 0.326 \cdot 2.39 + 0.134 \cdot 66.55 - 0.057 \cdot 22 + 0.326 \cdot 0.92 - 0.157 \cdot 25970/1000 \approx$

$57 \cdot 25970/1000 \approx E = 0.326 \cdot 2.39 + 0.134 \cdot 66.55 - 0.057 \cdot 22 + 0.326 \cdot 0.92 - 0.157 \cdot 25970/1000 \approx$

$\approx 0.779 + 8.929 - 1.254 + 0.299 - 4.077 \approx 4.676 \approx 0.779 + 8.929 - 1.254 + 0.299 - 4.077 \approx 4.676$.

3. Порівняння та обґрунтування

За розрахунками інтегрального показника ефективності, Freightliner Cascadia (4.676) має дещо вищу ефективність системи "двигун - трансмісія" ніж Volvo FM (4.254).

Вищий ККД трансмісії (0.92 проти 0.90) сприяє меншим втратам потужності.

Більш оптимальне відношення обертів і моменту. Дещо нижчі втрати в трансмісії.

На підставі цих результатів можна зробити висновок, що за інтегральним показником ефективності, розрахованим на основі наданої моделі та даних про два тягачі, Автопоїзд Freightliner Cascadia має дещо вищу ефективність системи "двигун - трансмісія".

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблення методології розрахунку інтегрального показника ефективності системи "дизельний двигун – трансмісія" є складною задачею, оскільки розвиток технологій проектування автопоїздів призводить до появи автопоїздів, для оцінки ефективності роботи яких в умовах, що постійно змінюються, тому буде потреба у збільшенні кількості чинників, значення та вплив яких змінюється в доволі широкому діапазоні. Відомі методи моделювання та розрахунку інтегрального показника, очевидно, дають змогу отримувати деякі наближення до реального значення показника ефективності системи "дизельний двигун – трансмісія", однак задача його розрахунку залишається актуальною.

Запропонований у цій статті підхід щодо розрахунку інтегрального показника ефективності системи "дизельний двигун – трансмісія" для автопоїзда під час міжнародних вантажних автомобільних перевезень є обґрунтованим, враховує тільки одну важливу складову ефективності: енергетичну. Однак, цей підхід може бути узагальнений. Зокрема, необхідно в цьому підході доповнити алгоритм врахуванням багатьох складових. Однак, задача узагальнення носитиме здебільшого технічний характер і пов'язана із більшою складністю. Аналіз цієї проблеми та одержані результати досліджень будуть викладені у наступних публікаціях.

Отже, коли існує свобода добору режимів сумісної роботи двигуна й трансмісії, оптимальними є моменти перемикавання передач, які забезпечують автомобілю найвищу паливну ощадність [15]. При цьому окремо про втілення особливих динамічних властивостей автомобіля говорити нема потреби: умова динамічності справджується у силу заданості динаміки руху автомобіля. Якщо ж програма руху машини зумовлена обмеженнями приймистості чи тягово-швидкісних можливостей, оптимальними стають моменти перемикавання передач, які максимально покращують динаміку автомобіля, а вимога паливної ощадності втрачає сенс.

Оцінка ефективності системи загалом узгоджується з іншими критеріями, такими як витрати палива, однак, слід враховувати, що реальні показники можуть відрізнятися залежно від умов експлуатації, навантаження, стилю водіння та інших факторів. Також, потрібно зазначити, що надійність та вартість обслуговування також є важливими факторами при виборі тягача автопоїзда для міжнародних вантажних автомобільних перевезень, і тут автопоїзд Volvo FM може мати переваги.

4. Оцінка переваг розглянутих тягачів за іншими критеріями

Витрати палива: За даними випробувань, обидва тягачі мають порівнянні показники витрати палива, але Freightliner Cascadia з двигуном Detroit DD15 часто показує дещо кращі результати на трасі.

Надійність: Volvo FM відомий своєю надійністю та довговічністю, хоча Freightliner Cascadia також має хороші показники, особливо з двигунами Detroit.

Вартість обслуговування: Вартість обслуговування може варіюватися залежно від регіону, але загалом Freightliner Cascadia може бути дешевше в обслуговуванні в Північній Америці, тоді як Volvo FM - в Європі.

ВИСНОВКИ

Сформульовано концептуальну модель методології визначення енергоефективності системи "двигун – трансмісія" сучасних дизельних автопоїздів. Методика враховує вимоги стандартів регулювання міжнародних вантажних перевезень і управління їх ефективністю та якістю. Оцінювання ефективності системи "двигун – трансмісія" ґрунтується на виявленні та визначенні ступенів впливу факторів, які можуть бути використані для уточнення визначення ефективності перевезення вантажів універсальними автопоїздами у міжнародному сполученні, що відкриває можливість забезпечення спрямованого синтезу елементів та підсистем інноваційних транспортних систем для досягнення заданих показників ефективності та якості.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Економіка логістичних систем: [Монографія] / За науковою редакцією Є. Криківського та С. Кубіва. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2008. – 596 с.
2. Кухтик Н.О. Національний транспортний університет. Уточнення математичної моделі руху автомобіля з урахуванням прогрівання двигуна в процесі руху. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія “Технічні науки” (ISSN: 2663-595X), К.: 2020. Том 31(70). № 4. С. 233-238.
3. Теорія руху транспортних засобів [Текст] : підручник / І. А. Вікович. – Л. - Л. : Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2013. – 671 с.
4. Hassan Moussa Nahim, Rafic Younes, Chadi Nohra, Mustapha Ouladsine. Complete Modeling for Systems of a Marine Diesel Engine. Journal of Marine Science and Application, 2015, 14(01): 93-104.
5. Хабутдинов Р. А. Системное формирование технологий автомобильных перевозок по критериям энерго- и ресурсоотдачи : дис. докт. техн. наук: 05.22.01. Киев, 2003. 332 с.
6. Хабутдинов Р. А., Коцюк О. Я. Энергоресурсная эффективность автомобиля. К.: УТУ, 1997. 137 с.
7. Гальона І. І. Підвищення енергоефективності перевезень дрібних партій вантажів в рамках життєвого циклу автомобіля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.01 «Транспортні системи» (275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)) - Національний транспортний університет, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.
8. Ачкасова Л.М. Оцінка ефективності процесу перевезення вантажів. Економіка транспортного комплексу. Вип. 24., 2014, с. 117-124
9. Таценко О. В. Критерії оцінки і вибору автотранспортних засобів для транспортних технологій [Електронний ресурс] / О. В. Таценко // Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції, (Мелітополь, 01-26 листопада 2021 р.) / ТДАТУ; ред. кол. В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь : ТДАТУ, 2021. - С. 473-477.
10. О.О. Соларьов, О.В. Таценко, Т.П. Волошко Критерії вибору транспортних засобів для перевезення вантажів / Ю / Комунальне господарство міст, 2022, том 6, випуск 173 - с. 189-194.
11. Критерії вибору великовагових транспортних засобів для ефективних і безпечних перевезень / В. В. Аулін, О. М. Тертиця, Т. М. Надич [та ін.] // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2024. - Вип. 10(41). - Ч. 2. - С. 169-187
12. Поляков А.П., Галушак О.О., Галушак Д.О., Грабенко М.Д. Методика вибору рухомого складу, маршруту і графіка перевезення вантажів. Наукові праці ВНТУ. 2011, №3. С. 1–10.
13. Самостян В.Р. Удосконалення процесу планування перевезення вантажів автомобільним транспортом: монографія / В.Р. Самостян, В.П. Онищук – Луцьк : ІВВ ЛНТУ, 2023. 158 с.
14. Аналіз показників енергетичної ефективності багатовісних автомобілів та багатоланкових автопоїздів / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов, М. М. Альокса, В. І. Омельченко // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Сер. : Автомобіле- та тракторобудування = Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Ser. : Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2023. – № 1. – С. 40-46.
15. Гашук П. М. Енергетична ефективність автомобіля / П. М. Гашук. – Львів: СВІТ, 1992. – 208 с.
16. Динаміка автомобіля / М. А. Подригало, В. П. Волков, А. А. Бобошко та ін. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2008. – 424 с.
17. Saaty T. L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York : McGraw-Hill International Book Co., 1980. 287 p.
18. Сааті Т. Прийняття рішень. Метод аналізу ієрархій / Т. Сааті. – М.: Радіо і зв'язок, 1993. – 320 с.
19. Проблеми організації, управління та підвищення ефективності транспортних перевезень / за ред. Л. М. Савчук, Г. С. Прокудіна: Монографія. – Дніпро: Пороги, 2021. – 300 с.

REFERENCES

1. Krykavskiy, Y., & Kubiv, S. (Eds.). (2008). Ekonomika logistychnykh system [Economics of logistic systems]. Lviv: Lviv Polytechnic National University Publishing.
2. Kukhtyk, N. O. (2020). Utochnennia matematychnoyi modeli rukhu avtomobilia z urakhuvanniam prohrivannia dvyguna v protsesi rukhu [Refinement of the mathematical model of vehicle motion

considering engine warm-up during movement]. *Vcheni Zapisky Tavriiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni Nauky*, 31(70)(4), 233–238.

3. Vikovych, I. A. (2013). *Teoriia rukhu transportnykh zasobiv* [Theory of vehicle motion]. Lviv: Lviv Polytechnic National University Publishing.

4. Nahim, H. M., Younes, R., Nohra, C., & Ouladsine, M. (2015). Complete modeling for systems of a marine diesel engine. *Journal of Marine Science and Application*, 14(1), 93–104.

5. Khabutdinov, R. A. (2003). *Systemnoe formirovanie tekhnologii avtomobilnykh perevozok po kriteriiam enerho- i resursootdachi* [System-based formation of automotive transportation technologies based on energy and resource efficiency criteria] (Doctoral dissertation). Kyiv.

6. Khabutdinov, R. A., & Kotsiuk, O. Ya. (1997). *Enerhoresurna efektyvnist avtomobilia* [Energy resource efficiency of a vehicle]. Kyiv: UTU.

7. Halyona, I. I. (2021). *Pidhyshchennia enerhoefektyvnosti perevezen dribnykh partii vantazhiv v ramkakh zhyttievoho tsyклу avtomobilia* [Improving energy efficiency of small cargo shipments within the vehicle life cycle] (PhD dissertation). National Transport University, Kyiv.

8. Achkasova, L. M. (2014). *Otsinka efektyvnosti protsesu perevezennia vantazhiv* [Evaluation of freight transportation efficiency]. *Ekonomika Transportnoho Kompleksu*, (24), 117–124.

9. Tatsenko, O. V. (2021). *Kryterii otsinky i vyboru avtotransportnykh zasobiv dlia transportnykh tekhnolohii* [Criteria for evaluation and selection of motor vehicles for transport technologies]. In *Teh. zabezpechennia innovatsiinykh tekhnolohii v APK: Materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. internet-konferentsii* (pp. 473–477). Melitopol: TSATU.

10. Solariov, O. O., Tatsenko, O. V., & Voloshko, T. P. (2022). *Kryterii vyboru transportnykh zasobiv dlia perevezennia vantazhiv* [Criteria for selecting vehicles for freight transport]. *Komunalne Hospodarstvo Mist*, 6(173), 189–194.

11. Aulin, V. V., Tertytsia, O. M., Nadych, T. M., et al. (2024). *Kryterii vyboru velykovahovykh transportnykh zasobiv dlia efektyvnykh i bezpechnykh perevezen* [Criteria for the selection of heavy-duty vehicles for efficient and safe transport]. *Tsentrálnoukrainskyi Naukovyi Visnyk. Tekhnichni Nauky*, 10(41)(2), 169–187.

12. Poliakov, A. P., Halushchak, O. O., Halushchak, D. O., & Hrabenko, M. D. (2011). *Metodyka vyboru rukhomoho skladu, marshrutu i hrafika perevezennia vantazhiv* [Methodology for selecting rolling stock, route, and schedule for freight transport]. *Naukovi Pratsi VNTU*, (3), 1–10.

13. Samostian, V. R., & Onyshchuk, V. P. (2023). *Udoskonalennia protsesu planuvannia perevezennia vantazhiv avtomobilnym transportom* [Improving the planning process of freight transport by road] (Monograph). Luts'k: IVV LNTU.

14. Podryhalo, M. A., Kaidalov, R. O., Alioksa, M. M., & Omelchenko, V. I. (2023). *Analiz pokaznykiv enerhetychnoi efektyvnosti bahatovisnykh avtomobiliv ta bahatolankovykh avtopoizdiv* [Analysis of energy efficiency indicators of multi-axle vehicles and multi-link road trains]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Seriya: Avtomobile- ta Traktorobuduvannia*, (1), 40–46.

15. Hashchuk, P. M. (1992). *Enerhetychna efektyvnist avtomobilia* [Energy efficiency of a vehicle]. Lviv: Svit.

16. Podryhalo, M. A., Volkov, V. P., Boboshko, A. A., et al. (2008). *Dynamika avtomobilia* [Vehicle dynamics]. Kharkiv: KhNADU Publishing.

17. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill.

18. Saaty, T. (1993). *Pryiniattia rishen. Metod analizu ierarkhii* [Decision making. The analytic hierarchy process]. Moscow: Radio i Sviaz.

19. Savchuk, L. M., & Prokudin, H. S. (Eds.). (2021). *Problemy orhanizatsii, upravlinnia ta pidvyshchennia efektyvnosti transportnykh perevezen* [Problems of organization, management, and efficiency improvement in transport logistics] (Monograph). Dnipro: Porohy.

Prykhodko V. Energy efficiency assessment of modern road trains for international freight transportation

The paper proposes an original modeling procedure and an improved statistical evaluation methodology for parameters characterizing the performance efficiency of the "engine – transmission" energy system of modern road trains Volvo FM and Freightliner Cascadia used in international freight transportation, equipped with Volvo D13 and Detroit DD15 diesel engines. The methodology is developed in

accordance with current international standards for freight transport, particularly regarding environmental sustainability, fuel efficiency, stability of technical characteristics, and economic feasibility.

The evaluation of the "engine – transmission" system efficiency is based on a comprehensive analysis of influencing factors, which enables a deeper understanding of the relationship between vehicle operating parameters and energy consumption during operation on international routes. The analytical hierarchy process and adapted statistical tools are employed to ensure the validity of conclusions and the practical applicability of the methodology. Special attention is given to identifying the most significant factors that affect the overall energy efficiency of road trains.

The theoretical foundation of the study is built upon the works of prominent researchers in the field of transport technologies and logistics, including Ihor Vikovych, Volodymyr Volkov, Petro Hashchuk, Heorhiy Prokudin, Anatolii Lebedev, Ihor Murovanyi, Volodymyr Sakhno, Mykhailo Podryhalo, Ramazan Khabutdinov, and others. The proposed results may prove useful for enhancing the efficiency of international freight transport, reducing fuel consumption, and improving the technical policy of motor transport enterprises.

Keywords: road train, diesel engine, transmission, energy efficiency, international transportation, freight, analytic hierarchy process.

ПРИХОДЬКО Всеволод Едуардович, аспірант кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: prykhodkovsevolod@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7582-1693>

Vsevolod PRYKHODKO, Postgraduate Student, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: prykhodkovsevolod@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7582-1693>

Автор висловлює подяку насамперед науковому керівнику Ігорю ВІКОВИЧУ за допомогу у написанні і редагуванні цієї статті, а також кафедрі транспортних технологій НУЛП за фахові поради.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1742

Савін Ю.Х., Соколенко О.В.
Національний транспортний університет, м.Київ

КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ІНФОРМАЦІЇ З БОРТОВОЇ ДІАГНОСТИКИ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Збільшення середнього віку рухомого складу автотранспортних підприємств вимагає чіткого контролю за його технічним станом. Розробка методів прогнозування на основі зібраної інформації від бортової діагностики є перспективним шляхом для вирішення кластеру задач з усунення незапланованих ремонтів та простоїв транспортних засобів.

Розповсюдженою є практика оновлення рухомого складу через придбання автомобілів з меншим напрацюванням ніж у наявних на підприємстві автомобілів. Історія автомобіля та файли первинної діагностики можуть бути недоступними. В такому випадку повноцінна інформація про стан вантажного автомобіля, якій пропонується придбати, дозволяє прийняти вірне управлінське рішення. Бортова діагностика сучасних автомобілів MAN, DAF, Volvo, Scania, Mercedes, Renault та Iveco фіксують більше 360 параметрів роботи різних систем. Серед цих параметрів можна обрати важливі для аналізу та накопичення даних з метою прогнозування майбутніх відмов. Практика рішення проблеми, що розглядається, вже існує та розробляється, але ще не є можливою для більшої частини застарілих транспортних засобів та доступною для широкого загалу учасників ринку перевезень.

При детальному огляді параметрів роботи паливної системи можна фіксувати передумови появи відмови, що впливає на розвиток автомобілем необхідної потужності та утримання заданої швидкості руху. Стан тиску наддува також завжди цікавить фахівців діагностування. Збирається інформація про низку важливих параметрів від турбонагнітача.

Від системи відпрацьованих газів фіксуються показники температури та складу газів. Це дає важливу інформацію про стан двигуна та процеси, що відбуваються під час його роботи. Аналізуючи тиск та температуру технічних рідин можна запобігти ремонтним роботам з високою вартістю.

Ключові слова: поступова відмова, діагностичні параметри, комп'ютерна діагностика, вантажні перевезення, автосканер, прогнозування технічного стану.

ВСТУП

Важливість контролю технічного стану транспортного засобу має першочергове значення для сучасних підприємств, що здійснюють вантажні перевезення в середині України та за її межами. Аналіз свідчить, що на більшості підприємств має місце збільшення середнього віку рухомого складу, через що збільшується частка автомобільного парку, що наближається або вже знаходиться в етапі інтенсивного зношення. Більшість автотранспортних підприємств (близько 64% від загальної кількості) має парк рухомого складу до 10 одиниць. Кількість АТП, які мають більше 100 автомобілів, складає менше 1%. В умовах зростання вартості палива менеджерам АТП потрібно враховувати економічно доцільні відстані на виконання робіт за кооперацією [1]. Оновлення автопарку сьогодні часто означає не придбання нового автомобіля з нульовим пробігом, а заміну на автомобіль з напрацюванням меншим від наявних транспортних засобів на підприємстві. Технічна діагностика застосовується на кожному етапі життєвого циклу автомобіля. Проте, найвищі вимоги і найскладніші задачі стоять перед нею на етапі експлуатації [3].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Повна та своєчасна інформація про технічний стан вантажного автомобіля дає можливість фахівцям приймати ефективні рішення відносно технічних впливів, ремонту або заміні вузлів автомобіля [2]. Не менш важливим є швидке отримання повноцінної інформації про технічний стан при виборі автомобіля з пробігом.

Сучасна вантажна автомобільна техніка характеризується високою конструктивною складністю, а також великою кількістю властивостей автомобіля. Властивості автомобільної техніки – це сукупність показників, що дають можливість ефективно її використовувати [9].

Для українських автотранспортних підприємств, що здійснюють вантажні автомобільні перевезення, в першу чергу важливі функціональні властивості автомобіля. До них відносять продуктивність та надійність [5]. Ці властивості відповідають за повноцінну реалізацію виробничої функції – переміщення вантажів та дають інформацію про перспективу експлуатації рухомого складу. Отримана інформація є основою для економічного аналізу та прийняття відповідних управлінських рішень. Фінансові резерви підприємств скоротились з початку повномасштабного вторгнення, тому допуск на помилку, для відповідальних за управлінські рішення менеджерів, зменшився.

До продуктивності в першу чергу відносять тягово-швидкісні властивості автомобіля, гальмівні властивості та керуваність автомобілем. Погіршення будь якої з цих властивостей призведе до зниження середньої швидкості руху нижче за можливу в певних умовах. В результаті буде знижена транспортна ефективність автомобіля.

Властивості надійності інформують фахівців про можливість функціонування автомобіля протягом заданого інтервалу часу або пробігу. До цих показників відносяться безвідмовність та довговічність. Можливий пробіг автомобіля до відмови та пробіг автомобіля протягом якого можливе його функціонування визначаються саме довговічністю [3].

До економічних властивостей автомобільної техніки відносять паливну економічність та витрати на обслуговування. Паливна економічність характеризує ефективність використання палива на виконання транспортної роботи, а витрати на обслуговування характеризують ефективність експлуатації автомобіля з точки зору витрат на володіння автомобілем.

Якщо розглядати автомобіль як систему, першим етапом наукового опису буде параметричний опис [9]. Параметри та показники характеризують ступінь виконання функцій або ефективність функціонування системи. Особливістю параметрів і показників є можливість їх безпосереднього кількісного вираження [4].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Визначити параметри контролю технічного стану транспортних засобів, що фіксуються бортовою діагностикою автомобілів DAF XF, MAN TG-X. Оцінити ефективність подальшого використання зібраної інформації для оцінки продуктивності та надійності транспортного засобу. Визначити перспективи використання отриманої інформації для прогнозування технічного стану транспортного засобу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Бортова діагностика автомобіля MAN TG-X надає інформацію про роботу двигуна, паливної системи, електронної гальмівної системи EBS, системи додаткового очищення відпрацьованих газів, підвіски, рульового керування, трансмісії, Retarder, резервної системи стисненого повітря, тахографа, обладнання та конструкції шасі та інших вузлів та систем. Оцінку параметрів можна провести за допомогою діагностичного сканера TEXA та програмного забезпечення IDC5 TRUCK.

Параметри роботи двигуна інформують про тягово-швидкісні властивості автомобіля. Відображаються тиск палива перед фільтром, температура палива, тиск оливи, температура оливи, температура охолоджуючої рідини, температура пального, значення на виході регулятора тиску, дійсний тиск напрямної, поточна кількість впорскування палива. Схематичне відображення параметрів приведено на рисунку 1.

Важливим параметром для фахівця є тиск палива в напрямній та тиск повітря наддува (див. рисунок 1). Ці параметри вказують на технічний стан двигуна вантажного автомобіля у розрізі можливості розвивати необхідну потужність [3]. Недостатній тиск призводить до зменшення потужності двигуна. Система управління подачею палива відразу вносить коригування для дотримання заданих показників. Проте при наявності механічного зносу датчику, форсунок або паливної рейки коригування тільки ситуативно усувають відхилення, проблема може розвиватись та призвести до відмови в паливній системі. Контроль за тиском палива є необхідною функцією бортової діагностики, що безпосередньо пов'язана з можливістю виконувати транспортну роботу [8]. Графічний моніторинг обраних параметрів зображено на рисунку 2.

Тиск повітря наддува, є другим параметром що розкриває інформацію про функціонування паливної системи автомобіля та ефективність роботи двигуна. У випадку зниження тиску до значень 0,5 – 0,6 бар двигун не буде розвивати повної потужності, що призведе до зниження продуктивності вантажного автомобіля [6]. Фахівці з діагностики приділяють особливу увагу функціонуванню турбонаддува та реагують на зміни параметрів його роботи (див. рисунок 2).

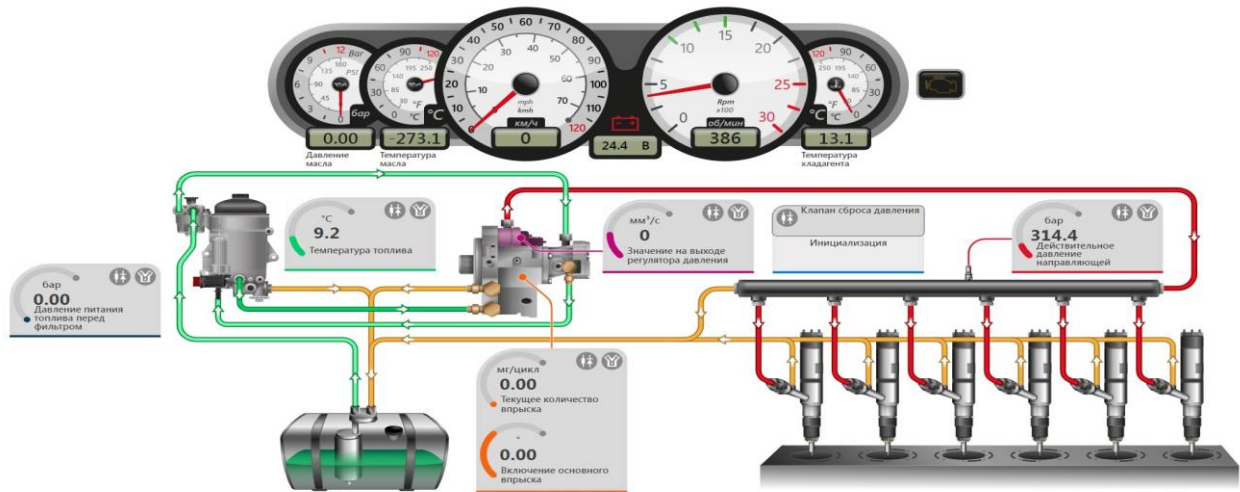


Рисунок 1 - Схематичне відображення параметрів контролю роботи двигуна автомобіля MAN TG-X в програмному забезпеченні TEXA IDC5. Тиск паливної системи автомобіля.

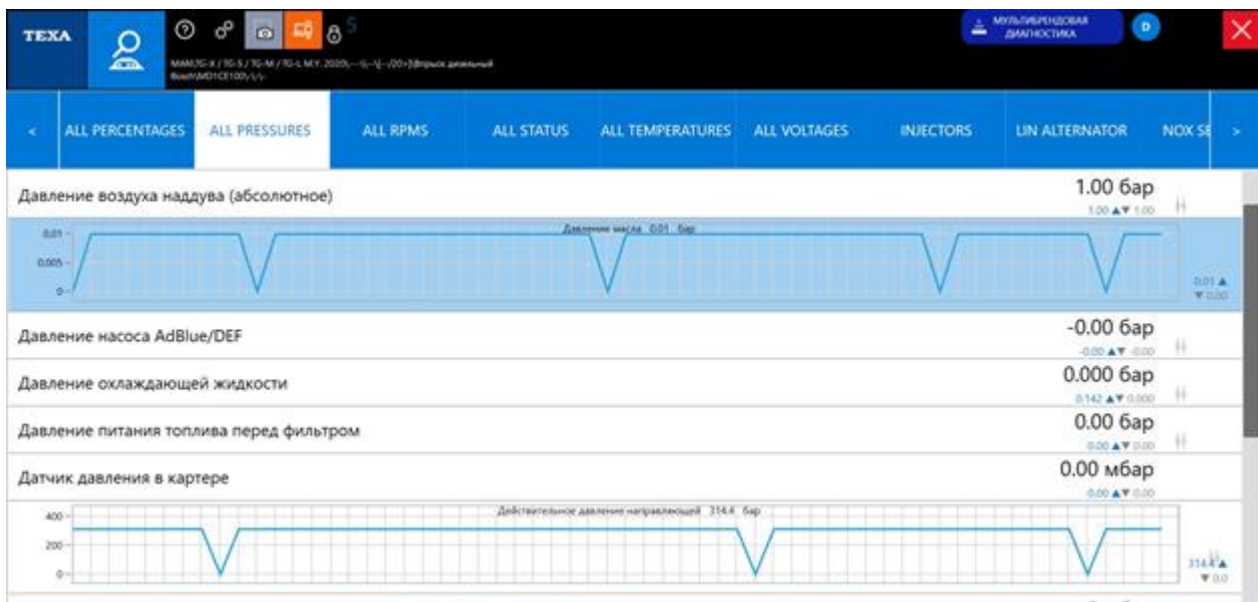


Рисунок 2 - Відображення параметрів тиску направляючої та тиску турбонаддува абсолютного в автомобілі MAN TG-X в програмному забезпеченні TEXA IDC5.

Також збирається інформація про реальне положення дросельного клапана, дросельного регулятора, масова витрата повітря – номінальна величина, показники датчика потоку повітря, зворотній тиск відпрацьованих газів на вході дросельного регулятора, швидкість турбонагнітача, температура турбонагнітача, режим роботи поточної рециркуляції відпрацьованих газів, задане значення EGR, поточне положення клапана ВГ турбокомпресора, зворотній тиск ВГ на вході системи очищення ВГ та поточний крутний момент двигуна. Схематичне відображення параметрів приведено на рисунку 3.

При використанні спеціалізованого діагностичного обладнання можна виконати тест компресії в циліндрах двигуна вантажного автомобіля без розбирання елементів двигуна. Відхилення в компресії будь-якого циліндра від показника циліндра визначеного еталонним більше ніж на 10% сигналізує про необхідність детального розгляду проблеми. Схематичне відображення тесту компресії вантажного автомобіля MAN TG-X зображено на рисунку 4.

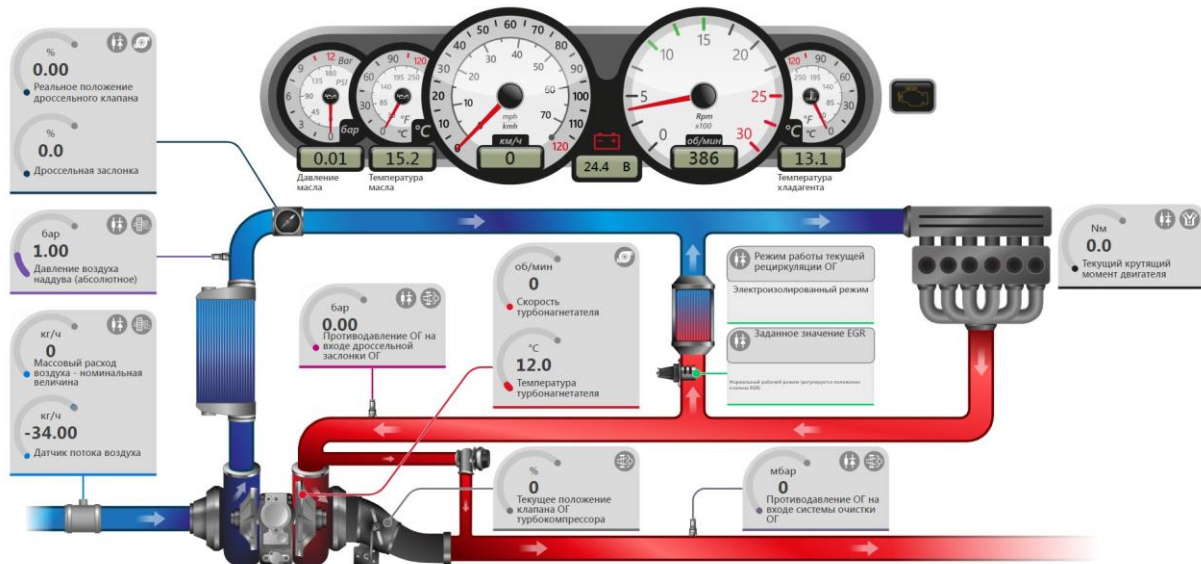


Рисунок 3 - Схематичне відображення параметрів контролю роботи двигуна автомобіля MAN TG-S в програмному забезпеченні TEXA IDC5. Параметри роботи наддува та системи EGR.

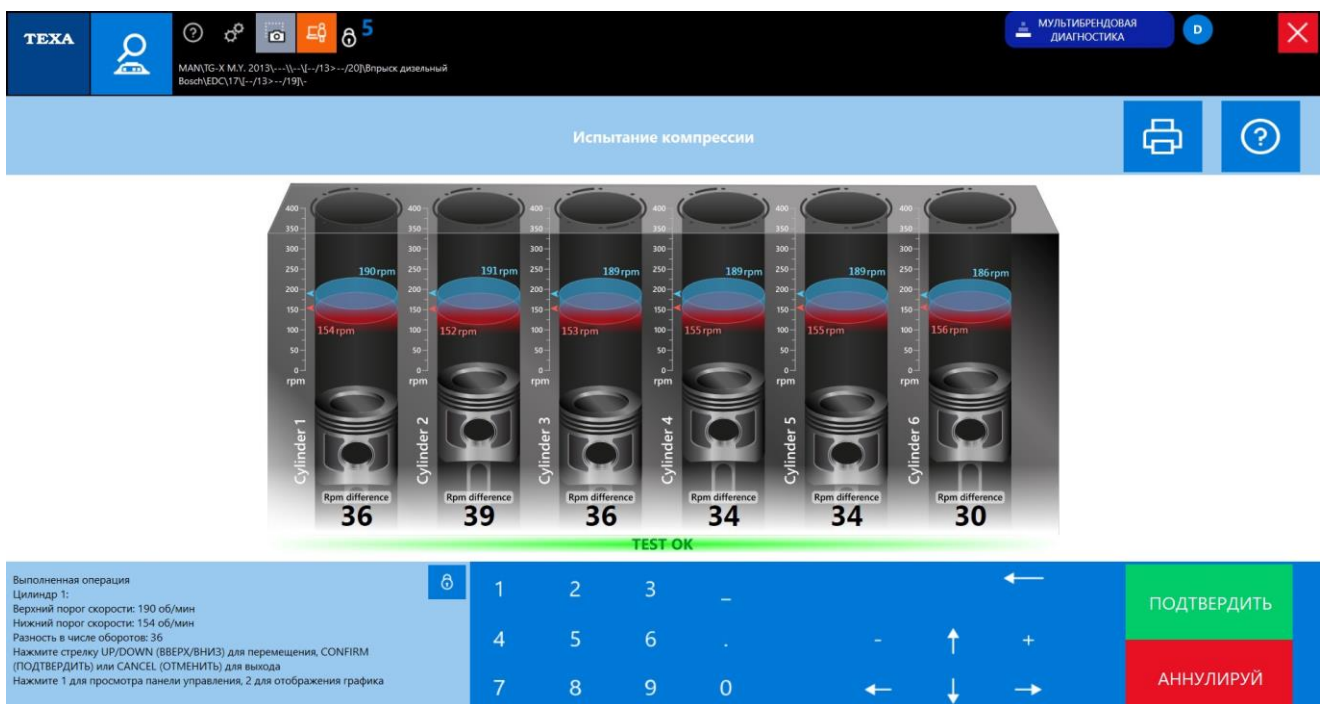


Рисунок 4 - Схематичне відображення тесту компресії двигуна автомобіля MAN TG-X в програмному забезпеченні TEXA IDC5.

Наступну частину інформації про технічний стан двигуна та екологічну ефективність автомобіля несуть параметри відпрацьованих газів. Такими є виміряна концентрація NOx на вході системи нейтралізації ВГ, температура відпрацьованих газів перед окислювачем, температура відпрацьованих газів після окислювача, диференційний тиск сажевого фільтра відпрацьованих газів, температура відпрацьованих газів після каталізатора SCR, виміряна концентрація NOx на виході системи нейтралізації ВГ, температура ВГ на виході сажевого фільтра, частота обертання насоса AdBlue/DEF, тиск насоса AdBlue/DEF, температура насоса AdBlue/DEF, навантаження фільтра твердих часток, виміряна маса сажи, об'єм сажи, рівень заповнення бака AdBlue, температура в баку AdBlue/DEF, виміряна якість AdBlue/DEF. Схематичне відображення параметрів приведено на рисунку 5.

Підвищення температури відпрацьованих газів сигналізує про розвиток проблеми в двигуні вантажного автомобіля. Фіксація першого відхилення та моніторинг накопичення відхилень дає можливість фахівцю зробити аналіз проблеми, сформулювати висновок про необхідність виконання технічного впливу та запланувати дату ремонту [7].

Аналіз параметрів тиску технічних рідин надає інформацію про справність системи мащення та охолодження двигуна. Відхилення в показниках цих параметрів може бути передумовою до поступової відмови в роботі двигуна, тому вимагають контролю. Параметри контролю тиску оливи, тиску насоса AdBlue, тиску охолоджуючої рідини для автомобіля MAN TG-X зображено на рисунку 5.

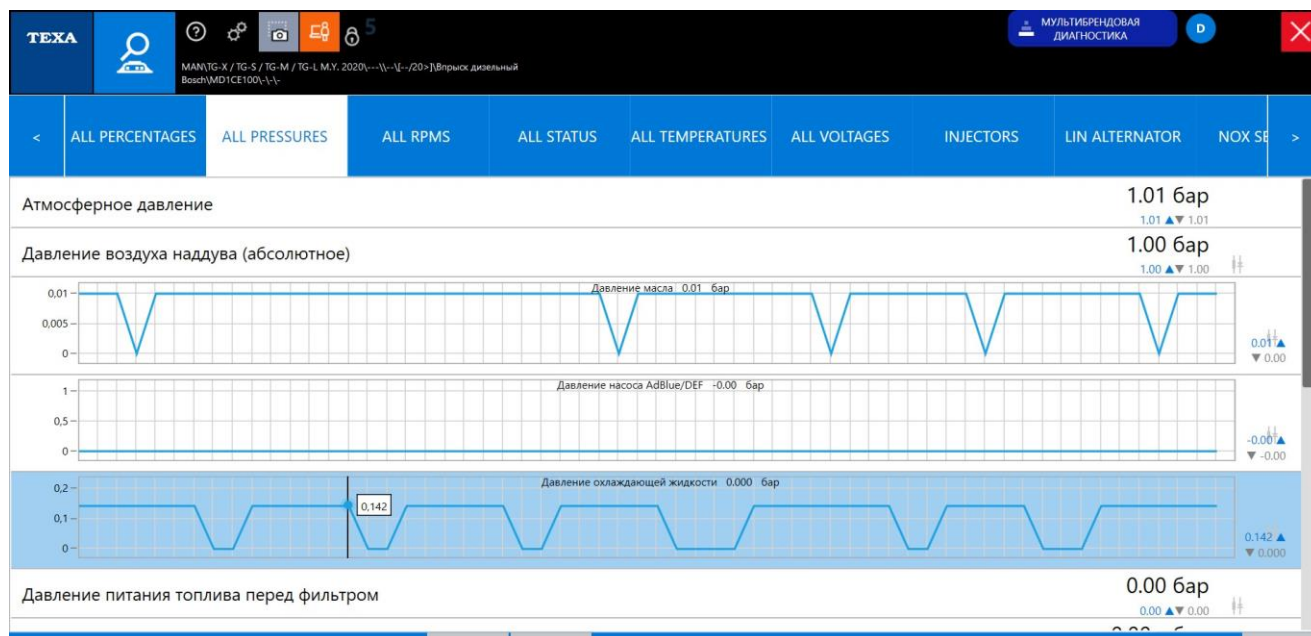


Рисунок 5 - Відображення тиску оливи, тиску насоса AdBlue, тиску охолоджуючої рідини в автомобілі MAN TG-S в програмному забезпеченні TEXA IDC5.

Безпосередньо відображається потужність, що може бути розвинена двигуном, значення поточного крутного моменту двигуна. Поточний крутний момент двигуна автомобіля MAN TG-X контролюється та відображається в графічному варіанті на рисунку 6.

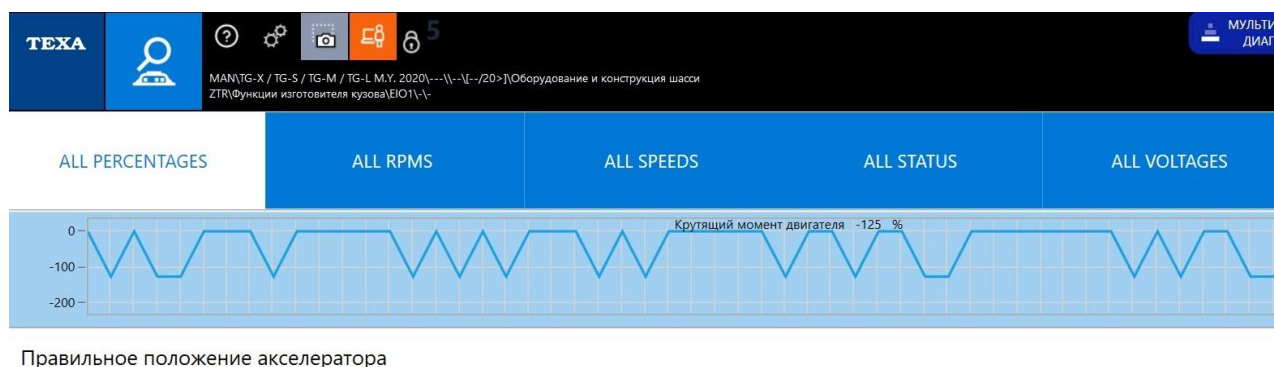


Рисунок 6 - Відображення поточного крутного моменту двигуна в автомобілі MAN TG-X в програмному забезпеченні TEXA IDC5.

Електронна гальмівна система EBS відповідає за можливість підтримувати автомобілем заданої середньої швидкості руху. Бортовою діагностикою фіксуються швидкість відхилення від заданого напрямку руху та бокове відхилення. Також фіксується тиск в модуляторах по осям та колесам. Схематичне зображення датчиків контролю параметрів зображено на рисунку 7.

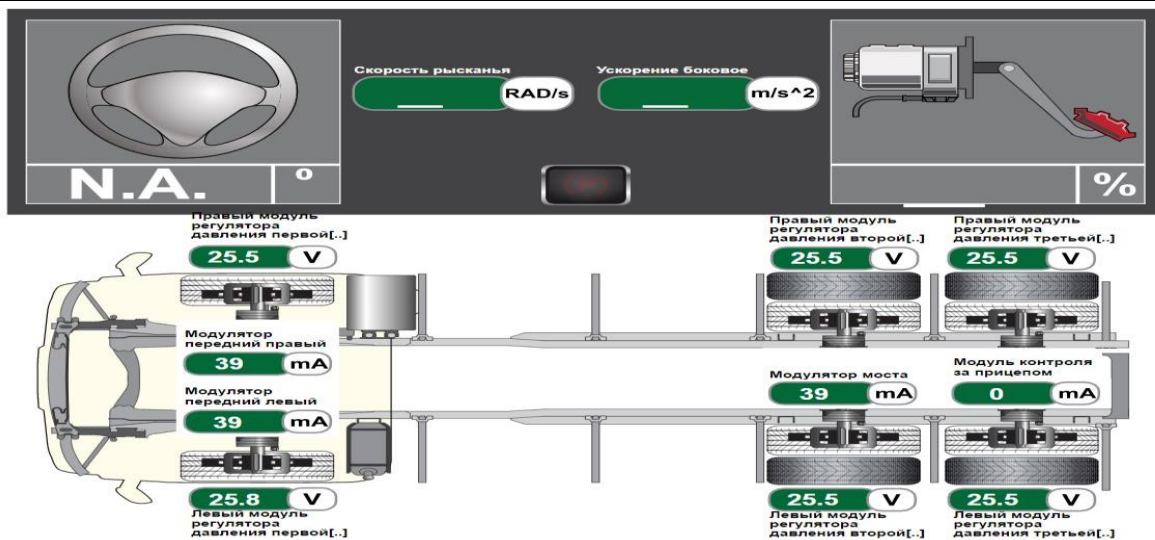


Рисунок 7 - Електронна гальмівна система EBS автомобіля MAN TG-X схематичне відображення в програмному забезпеченні TEXA IDC5.

Важливим для власників вантажних транспортних засобів є контроль стану гальмівних колодок по трьом осям. Невчасна заміна гальмівних колодок може призвести до зупинки в рейсі та проведення непланового ТО в несприятливих умовах. Бортова діагностика автомобіля MAN TG-X фіксує положення педалі гальма і передає дані у відсотковому відображенні.

Стан трансмісії безпосередньо впливає на здатність транспортного засобу виконувати свою роботу по переміщенню вантажів. Умовно-раптова відмова будь-якого вузла трансмісії призведе до зупинки вантажівки та неможливості виконувати транспортну роботу.

Бортовою діагностикою контролюється положення акселератора, відносний хід зчеплення у відсотках, абсолютний хід зчеплення, запрошений хід зчеплення, зношення муфти зчеплення, поточне замкнене положення, включене положення нового зчеплення, контролюється обрана передача, положення датчика перемикавання коробки переключення передач. Також контролюється вихідна швидкість, обрана та задіяна передачі, що відображено на рисунку 8.

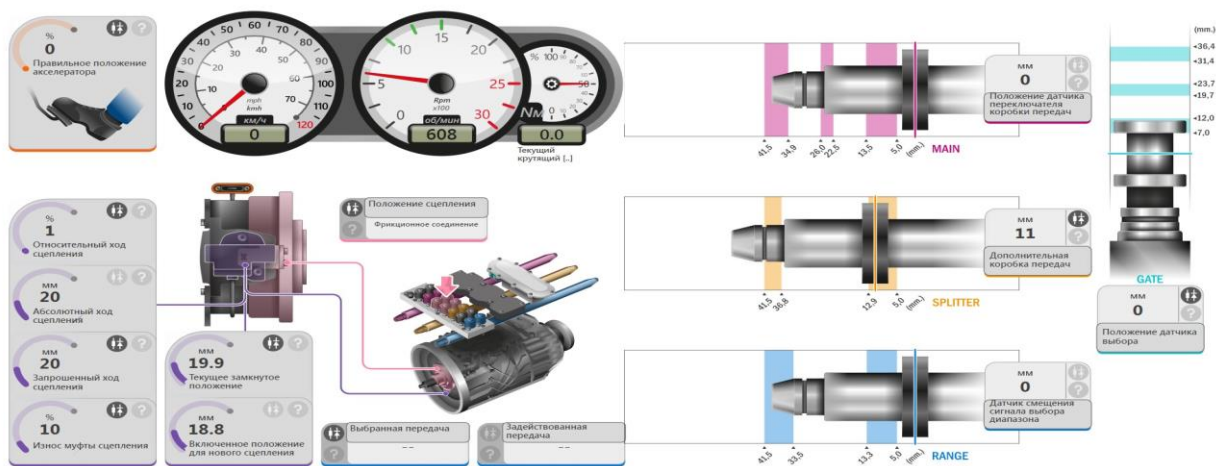


Рисунок 8 - Схематичне зображення контрольних датчиків трансмісії автомобіля MAN TG-X в програмному забезпеченні TEXA IDC5.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Бортова діагностика автомобіля MAN TG-X фіксує 131 параметр від двигуна, паливної системи та системи відпрацьованих газів, 74 параметра від електронної гальмівної системи EBS, 40 параметрів від датчиків підвіски, 48 параметрів від трансмісії, 22 параметра від модуля рами, 17 параметрів системи технічного обслуговування, 8 параметрів від стоянкового гальма, 21 параметр від

системи керування стисненим повітрям, 15 параметрів від блоку ретардера. Загально контролюється 361 параметр. Інформація отримується безперервно під час роботи автомобіля. Можливе накопичення статистичних даних та виконання контрольних тестів. Фахівці отримують повний доступ до історії експлуатації та виникнення помилок, що є передумовами несправності. Таким чином можливо проаналізувати інформацію від всіх ключових системи автомобіля. Багаторазово виявлено залежність між помилками зафіксованими різними блоками, що вказують на розвиток однієї проблеми.

ВИСНОВКИ

Точний підбір параметрів, що є інформативними, вимірювальними та змінюваними в часі, дає можливість накопичувати та аналізувати інформацію про технічний стан автомобіля, визначати необхідність технічного впливу, робити прогнозування технічного стану з можливим звітом для прийняття управлінських рішень керівництвом підприємства. Повноцінна діагностика технічного стану можлива при робочих навантаженнях автомобіля. Доцільно знімати інформацію з бортової діагностики під час виконання вантажним автомобілем робочого рейсу з вантажем. Для цього важливо використовувати всі можливості телематичного оснащення автомобілів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Савін Ю.Х. Визначення економічно доцільних відстаней доставки автомобілів на підприємства автосервісу / Ю.Х. Савін, М.В. Митко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Науковий журнал. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – Вип. 2 (143). – С. 99-104.
2. Поляков А.П. Методи визначення технічного стану основних систем автомобіля / А.П. Поляков, О.М. Плахотник // Вісник ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2016 – №3 (46).
3. Форнальчик Є. Ю. Технічна експлуатація та надійність автомобілів: навч. посіб. / Є. Ю. Форнальчик, М. С. Оліскевич, О. Л. Мاستикаш, Р. А. Пельо. – Львів: Афіша, 2004. – 492 с.
4. Використання інтелектуальних інформаційних технологій позиціонування для контролю теплових параметрів системи комбінованого прогріву ДВЗ транспортного засобу / Матейчик В. П. та ін. // Вісник ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ. 2012. – № 3 (62). – С. 136–141.
5. Матейчик В. П. Методи оцінювання та способи підвищення екологічної безпеки дорожніх транспортних засобів: монографія. – Київ: НТУ, 2006. – 216 с.
6. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: підручник / Лудченко О.А. – К.: Знання-Прес, 2003. – 511 с.
7. Мігаль В.Д. – Технічна діагностика автомобілів. Теоретичні основи. :навч. посіб. / Мігаль В.Д., Щепкін А.В. – Харків, 2014. – 516 с.
8. А.В. Сохацький, О.В. Трофімов, О.Д. Фірсов. – Динаміка автомобільних та інших транспортних засобів. Частина 1 Тягово-швидкісні властивості автотранспортних засобів. Паливна економічність: навч. посіб. / А.В. Сохацький, О.В. Трофімов, О.Д. Фірсов. – Дніпро, 2018 – 56 с.
9. М.Ф. Дмитриченко, В.П. Матейчик, О.К. Гришук, М.П. Цюман – Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посіб. / навч. посіб. М.Ф. Дмитриченко, В.П. Матейчик, О.К. Гришук, М.П. Цюман – Київ: НТУ, 2014 – 168 с.

REFERENCES

1. Savin Y.F. Determination of Economic Advisable Distances of Automobile Delivery on Autoservice Enterprise. Savin Y.F., Mytko M.V. // Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute. Scientific journal. – Vinnytsia: VNTU, 2019. – Issue 2 (143). – P. 99-104.
2. Polakov A.P., Plakhotnyk O.M. Methods of determination technical state of automobile's basic systems / Polakov A.P., Plakhotnyk O.M. // Bulletin of ZhGTU. – Zhytomyr: ZhGTU, 2016 – No. 3 (p 46).
3. Fornalchik Y.Y. Technical operation and reliability of cars: a training manual: tutorial / E. Yu. Fornalchik, M. S. Olishevich, O. L. Mastykash, R. A. Pelyo. – Lviv: Afisha, 2004. – 492 p.
4. Use of intelligent positioning information technologies for controlling thermal parameters of the combined heating system of the internal combustion engine of a vehicle / Mateychik V. P. et al. // Bulletin of ZhGTU. – Zhytomyr: ZhGTU. 2012. – No. 3 (62). – p. 136–141.
5. Mateychik V. P. Methods of assessment and ways to improve the environmental safety of road vehicles: monograph. – Kyiv: NTU, 2006. – 216 p.
6. Ludchenko O.A. Maintenance and repair of automobiles: textbook / Ludchenko O.A. – K.: Znannya-Press, 2003. – 511 p.

7.Migal V.D. – Technical diagnostics of cars. Theoretical foundations. : teaching aid. / Migal V.D., Shchepkin A.V. – Kharkiv, 2014. – 516 p.

8.Sokhatsky A.V., Trofimov O.V., Firsov O.D. – Dynamics of automobiles and other vehicles. Part 1 Traction and speed properties of motor vehicles. Fuel economy: textbook. / Sokhatsky A.V., Trofimov O.V., Firsov O.D. – Dnipro, 2018 – 56 p.

9.Dmytrichenko M.F., Mateychik V.P., Hryshchuk O.K., Tsyuman M.P. – Methods of system analysis of properties of automotive equipment: manual / manual. Dmytrichenko M.F., Mateychik V.P., Hryshchuk O.K., Tsyuman M.P. – Kyiv: NTU, 2014 – 168 p.

Savin Y. F., Sokolenko O. V. Control of the technical condition of vehicles through analysis of information from on-board diagnostics during operation.

The increase in the average age of the rolling stock of motor transport enterprises requires clear control over its technical condition. The development of forecasting methods based on the information collected from on-board diagnostics is a promising way to solve a cluster of problems to eliminate unplanned repairs and downtime of vehicles.

The practice of updating the rolling stock by purchasing vehicles with less mileage than the vehicles available at the enterprise is widespread. The history of the vehicle and primary diagnostic files may be unavailable. In this case, complete information about the condition of the truck that is proposed to be purchased allows you to make the right management decision. On-board diagnostics of modern MAN, DAF, Volvo, Scania, Mercedes, Renault and Iveco vehicles record more than 360 parameters of the operation of various systems. Among these parameters, you can select important ones for analysis and accumulation of data in order to predict future failures. The practice of solving the problem under consideration already exists and is being developed, but is not yet possible for most of the outdated vehicles and accessible to the general public of transportation market participants.

With a detailed review of the fuel system operating parameters, it is possible to record the prerequisites for the occurrence of a failure, which affects the development of the required power by the car and maintaining a given speed. The state of boost pressure is also always of interest to diagnostic specialists. Information is collected on a number of important parameters from the turbocharger.

Temperature and gas composition indicators are recorded from the exhaust gas system. This provides important information about the condition of the engine and the processes occurring during its operation. By analyzing the pressure and temperature of technical fluids, it is possible to prevent high-cost repair work.

Key words: gradual failure, diagnostic parameters, computer diagnostics, freight transportation, auto scanner, technical condition prediction.

САВІН Юрій Хомич - кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри «Технічна експлуатація автомобілів та автосервіс», e-mail: ghsavin@gmail.com, тел. +380684504526, Україна, 01010, м. Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, orcid.org/0000-0003-4329-665X.

СОКОЛЕНКО Олександр Вікторович - Національний транспортний університет, аспірант кафедри «Технічна експлуатація автомобілів та автосервіс», e-mail: ovsl2022@gmail.com, тел. +380674074893, Україна, 01010, м. Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, <https://orcid.org/0009-0007-6085-5843>.

SAVIN Yuri F. - Ph.D., Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of department "Technical operation of cars and car services", e-mail: ghsavin@gmail.com, tel. +380684504526, Ukraine, 01010, m. Kyiv, str. Mikhail Omelyanovich-Pavlenko, 1, k. 410, orcid.org/0000-0003-4329-665X.

SOKOLENKO Oleksandr - National Transport University, Post graduate student of the "Technical operation of cars and car service" department, e-mail: ovsl2022@gmail.com, tel. +380674074893, Ukraine, 01010, Kyiv, str. Mykhailo Omelyanovich-Pavlenka, 1, k 410. orcid.org/0009-0007-6085-5843.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1743

УДК 629.33; 621.38(075.32)

UDK 629.33; 621.38(075.32)

Сафаров Е.Г., Романюк О.О., Смачило О.В.

*Відкритий міжнародний університет розвитку людини "Україна"***МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІАМІДІВ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Розвиток сучасних технологій потребує застосування нових інноваційних матеріалів. Поліаміди серії ПА, які відносяться до термопластичних полімерів, завдяки своїй міцності, зносостійкості, стійкості до хімічних речовин та термостійкості широко використовуються у конструкційних елементах автомобілів. Теплостійкість поліаміду надзвичайно затребувана в підкапотному просторі, де від пластику вимагається довготривала експлуатація при високих температурах. Близькі за властивостями до кераміки, поліаміди зі склонаповнювачем використовують у виробництві розеток і вимикачів. Поліаміди з ізотропною усадкою застосовують для точного лиття в електроніці. У зв'язку з цим виникає потреба у визначенні динамічних механічних характеристик поліамідів.

Як об'єкти дослідження взяти такі марки поліамідів: ПА 610 (паливні та масляні трубки (автоіндустрія), кабельні оболонки, спортивний інвентар), ПА 610-РМ (деталі, що вимагають підвищеної міцності або термостійкості, ізоляція в електротехніці, вузли тертя з низьким коефіцієнтом тертя), ПА 6-ЛТ-У1-РМ (конструкційні деталі, шестерні, підшипники, електротехнічні корпуси, автокомпоненти), ПА66 - 2 (вузли тертя, зубчасті передачі, клемники, розетки), ПА66-2РМ (вузли з високим механічним навантаженням, деталі з постійною роботою за підвищеної температури, ізоляційні матеріали, втулки, що направляють), ПА6-ЛТ-СВУ2 (ТУ 6-05-211-1411-85), ПА66-1-Л-СВ30(ТУ 6-05-211-1424-86).

У цій статті описані результати випробувань поліамідів на динамічний стиск.

Ключові слова: поліамід, електротехнічні матеріали, автомобільний транспорт, сучасне машинобудування, ізоляційні матеріали, імпульсне навантаження, динамічні випробування, триботехніка.

ВСТУП

У зв'язку з вищевикладеним, для інженерних розрахунків у галузі розробки сучасних техніки та технології актуальна наявність даних про вплив швидкості навантаження на міцнісні та деформаційні характеристики поліамідів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

З метою визначення механічних характеристик матеріалів при високих швидкостях навантаження розроблено ряд методик [1], що дозволяють реєструвати зусилля за імпульсної взаємодії тіл. З цією метою реєструють переміщення торця ударника високошвидкісною камерою або перетворювачем прискорення. Дані методики мають низку недоліків та обмежень. У методиках реєстрації сили взаємодії, заснованих на визначенні негативного прискорення або переміщення похибка отриманих даних може досягати 25% внаслідок нехтування хвильовими процесами та подвійного графічного диференціювання.

Вільні від вищезазначених недоліків методики [2-5], в яких зусилля взаємодії оцінюються по пружній деформації силовимірника на деякій відстані від зони контакту, що реєструється за допомогою тензорезисторів. Однак, при високих навантаженнях на фронті навантажень тензорезистори виходять з ладу в початковій стадії процесу. У роботі [6] описано методику безперервної реєстрації зусилля взаємодії за допомогою ємнісного датчика. Ця методика вільна від нестачі тензорезисторів, пов'язаних із навантаженнями.

Хоча визначення динамічних характеристик міцності присвячено безліч робіт, є необхідність в отриманні експериментальних даних більш простими експрес-методами.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціллю роботи є отримання експериментальних даних і на їх основі аналізування впливу швидкості деформації на характеристики поліамідів при стисканні. Важливим фактором є те, що описане дослідження не вимагає трудомісткої осцилографічної реєстрації залежності "зусилля-деформація" для оцінки механічних характеристик випробуваного матеріалу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати випробувань на ударний стиск. Аналізовано вплив швидкості деформації на міцнісні та деформаційні характеристики поліамідів

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Статичні та динамічні випробування на стиск виконували за методикою [7]. Циліндричний зразок 1 (рис.1) розміщують між передавальним бойком 2, виконаним зі сферичною головкою для

вирівнювання зусилля по всьому перерізу та опорним конічним індентором 3, який упирається на площину силовимірювального елемента 4 у вигляді диска, розміщеного на масивній ковадлі 5.

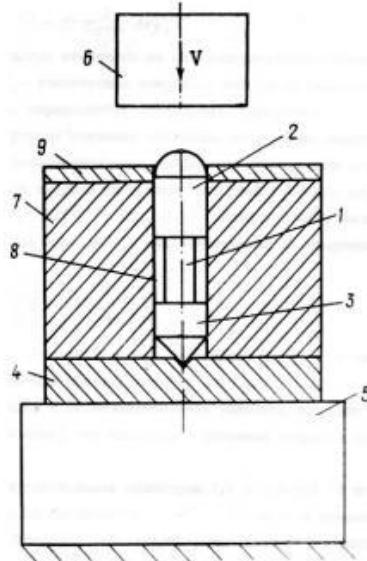


Рисунок 1. Схема проведення експерименту

При виборі конічної форми індентора виходили з відносної простоти виготовлення та необхідності однакового ступеня відносної деформації в міру застосування, що визначається геометричною подібністю відбитків. Зразок навантажували ударом баби 6 по передаючому бойку 2. Для забезпечення співвісності бойок і індентор центрують втулкою 7 з направляючим отвором 8. Необхідний ступінь деформації зразка забезпечується обмежувальними шайбами 9. Силовимірювальний елемент попередньо тарується статичним впровадженням у нього недеформованого конічного індентора під гідропресом, реєстрацією зусилля впровадження та відповідних йому розмірів відбитка. Силовимірювальний елемент виготовляли з матеріалу, малочутливого до швидкості деформації в межах $\dot{\epsilon} < 10^3 \text{ с}^{-1}$ (сплав Д16Т), що дозволяє при динамічному навантаженні користуватися статичною таріровкою.

Максимальне зусилля, що діє на зразок, визначається виразом:

$$P = \pi r_m^2 H_s,$$

де r_m - радіус відбитка на силовимірювальному елементі;

$H_s = P_{\max} / \pi r_{\max}^2$ - твердість матеріалу силовимірювального елемента, визначається статичною таріровкою. Для побудови істинної діаграми стиснення "напруження-деформація" проводять ряд послідовних навантажень випробуваного зразка, визначаючи після кожного його відносну деформацію $\epsilon_i = (h_0 - h_i) / h_0$ (h_0 , h_i - відповідно початкова та поточна висота зразка), $r_{n,i}$ - поточний радіус зразка та відповідні їй напруження:

$$\sigma_i = P_i / \pi r_{n,i}^2 = H_s (r_{m,i} / r_{n,i})^2,$$

де $r_{m,i}$ - поточний радіус відбитка; $r_{n,i}$ - поточний радіус зразка; σ_i - поточні дійсні напруження. При необхідності підвищення швидкості деформування зразка, в силовимірювальному елементі утворюють попередній відбиток, що призводить до зниження швидкості впровадження індентора.

Зразки виготовляли діаметром 7,5 мм та висотою 14 мм, яких випробовували на статичний ($v = 10^{-5} \text{ м/с}$) та динамічний ($v = 6 \text{ м/с}$) стиск.

Параметри проведених експериментів відповідають експлуатації деталей із поліамідів у реальних умовах експлуатації.

Стеклонаповнені поліаміди ПА6-ЛТ-СВУ2, ПА66-1-Л-СВ30 як при статичному, так і при динамічному стисканні руйнувалися крихко після одноразового навантаження з утворенням характерного конуса деформацій зсуву або сколу під кутом, близьким до 45° . У таблиці 1 наведено значення максимальних $\sigma_{\max}$ та середніх σ_{avg} напружень крихкого руйнування поліамідів на стиск.

Таблиця 1. Максимальні $\sigma_{\max}$ та середні σ_{avg} напруження крихкого руйнування поліамідів на стиск.

Марка	v , м/с	$\sigma_{\max}$, МПа	σ_{avg} , МПа
ПА6-ЛТ-СВУ2	10^{-5}	152.5	
		141.5	

ПА6-ЛТ-СВУ2	6	135.5	139.0
		137.0	
		263.5	242.0
ПА66-1-Л-СВ30	10^{-5}	234.0	
		250.0	
		229.0	
		234.0	
		162.5	164.0
ПА66-1-Л-СВ30	6	138.0	
		200.0	
		160.0	
		161.0	
		249.0	257.0
ПА66-1-Л-СВ30	6	266.5	
		236.5	
		243.0	
		250.0	

Поліаміди ПА 610, ПА 610-РМ, ПА 6-ЛТ-У1-РМ, ПА66 - 2, ПА66-2РМ як у статичному, так і в динамічному стиску деформувалися пружно-пластично. Умовні (червоні) та дійсні (чорні) діаграми деформування при стисканні наведені на рис. 2.

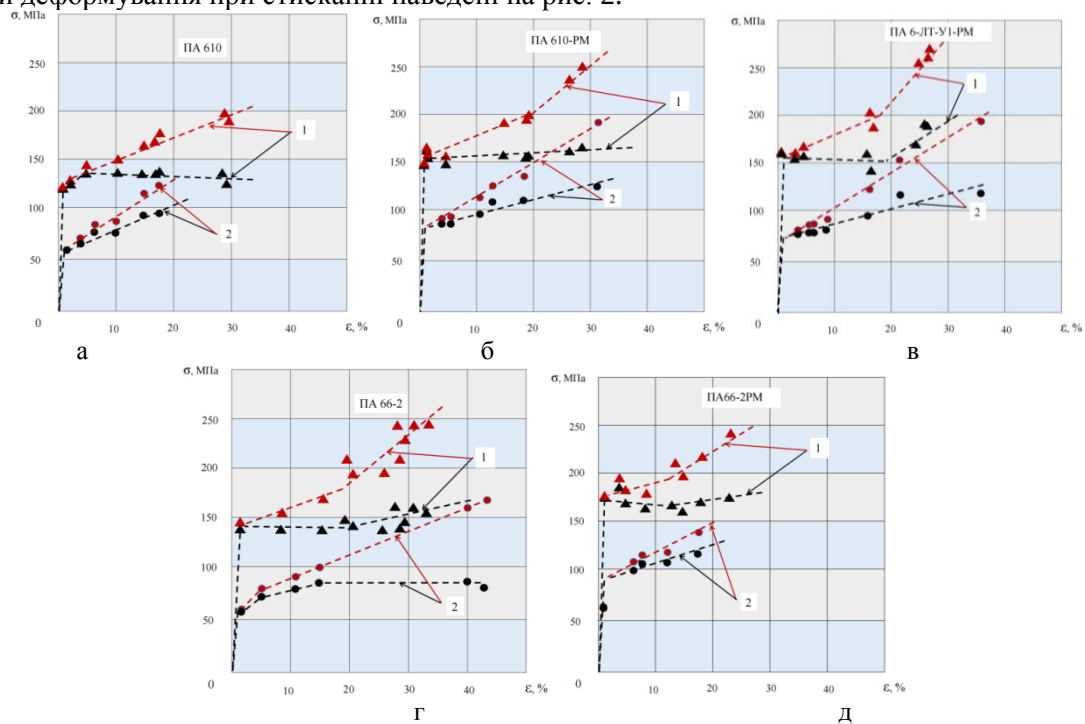
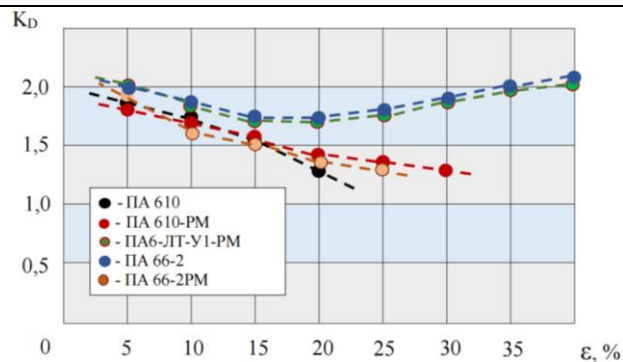


Рисунок 2. Умовні (червоні) та дійсні (чорні) діаграми деформування. а- ПА 610; б- ПА 610-РМ; в- ПА 6-ЛТ-У1-РМ; г- ПА66 - 2; д- ПА66-2РМ; (1 - $v = 6$ м/с; 2 - $v = 10^{-5}$ м/с).

За отриманими даними, збудовано залежність коефіцієнта динамічності $K_D = \sigma_i(v=6 \text{ м/с}) / \sigma_i(v=10^{-5} \text{ м/с})$ від ступеня деформації ϵ (рис.3).

Рисунок 3. Залежність коефіцієнта динамічності K_D від ступеня деформації ε .

ВИСНОВКИ

Стеклонаповнені поліаміди марок ПА6-ЛТ-СВУ2, ПА66-1-Л-СВ30 при стисканні руйнуються крихко незалежно від швидкості деформування. Поліаміди марок ПА 610, ПА 610-PM, ПА 6-ЛТ-У1-PM, ПА66 - 2, ПА66-2PM показують значну пластичність 20-40%. У міру зростання відносної деформації до 20% усі марки поліамідів (крім ПА6-ЛТ-СВУ2, ПА66-1-Л-СВ30) мають тенденцію до зниження коефіцієнта динамічності K_D від 1,7...2,0 до 1,5...1,75, що показує зниження впливу швидкості деформації. Подальше зростання деформації до 40% супроводжується збільшенням коефіцієнта динамічності для поліамідів марок ПА 6-ЛТ-У1-PM, ПА66 – 2 від 1,75 до 2,1.

Дійсні нормальні напруження зі зростанням швидкості деформування від 10^{-5} м/с до 6 м/с збільшуються 1,3...2,1 разів. Найбільш яскраво виражено вплив швидкості деформації для поліамідів марок ПА 6-ЛТ-У1-PM, ПА66-2. Отримані дані показують значний вплив швидкості деформування на характеристики міцності випробуваних поліамідів, що необхідно враховувати в конструкторських розрахунках.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Зубов В.І., Степанов Г.В., Широков О.В. Вплив швидкості деформації на межу плинності сталей різної міцності // Проблеми міцності.- 2003.- №5. С. 113-121.
2. Стрижало В.О., Бородій М.В. Експериментальні методи в механіці деформівного твердого тіла. Навчальний посібник // Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2022. - 306с.
3. Ващенко О.П. Експериментальні методи та механізми властивості конструкційних матеріалів при високошвидкісному деформуванні ($10^2...10^5$ с $^{-1}$) та температурах 77...773 ^{0} К // Проблеми міцності.- 2002.- №3. С. 55-61.
4. Ващенко О. П. Механічні випробування конструкційних матеріалів за високошвидкісного розтягу у широкому діапазоні температур. Навчальний посібник // Київ: Національний трансп. ун-т, 2000. - 93 с.
5. Сафаров Е.Г. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Поведінка матеріалів при імпульсному навантаженні». Навчальне видання // Київ: Університет «Україна», 2025.-24 с.
6. Ващенко А.П., Степанов Г.В., Сафаров Е.Г. Динамічний опір конструкційних матеріалів зрізу // Проблеми міцності.- 1987.- №2. С. 45-47.
7. Степанов Г.В. Сафаров Е.Г. Авторське свідоцтво «Спосіб динамічних випробувань матеріалів» № 1434321 від 1.07.1988 р.

REFERENCES

1. Zubov V.I., Stepanov G.V., Shirokov O.V.(2003). Vplyv shvydkosti deformatsiyi na mezhu plynnosti staley riznoyi mitsnosti [Effect of strain rate on the yield strength of steels of different strengths]. *Problemy mitsnosti*, [in Ukrainian].
2. Stryzhalo V.O., Borodiy M.V.(2022). Eksperymental'ni metody v mekhanitsi deformivnoho tverdoho tila. Navchal' nyu posibnyk [Experimental methods in deformable solid mechanics]. *Natsional'nyy tekhnichnyy universytet Ukrayiny «Kyiviv'kyu politekhnichnyy instytut imeni Ihorya Sikors'koho»*, [in Ukrainian].
3. Vashchenko O.P.(2002). Eksperymental'ni metody ta mekhanizmy vlastyvyosti konstruksiyinykh materialiv pry vysokoshvydkisnomu deformatsiyi ($10^2...10^5$ s $^{-1}$) ta temperaturakh 77...773 K [Experimental

methods and mechanisms of the properties of structural materials at high-speed deformation ($10^2...10^5$ c⁻¹) and temperatures 77...773⁰ K]. *Problemy mitsnosti*, [in Ukrainian].

4. Vashchenko O.P.(2000). Mekhanichni vyprobuвання konstruktsiynykh materialiv za vysokoshvydkisnoho roztyahu u shyrokomu diapazoni temperatur. Navchal' nyy posibnyk [Mechanical testing of structural materials under high-speed tension in a wide temperature range]. Kyiv, *Natsional'nyy transportnyy universytet*, [in Ukrainian].

5. Safarov E.G.(2025). Metodichni rekomendatsiyi do vykonannya praktychnykh robot z navchal'noy dystsypliny "Povedinka materialiv pry impul'snom navantazheni". Navchal'ne vydannya [Methodological recommendations for performing practical work on the academic discipline "Behavior of materials under impulse loading"]. Kyiv, *University "Ukraine"*, [in Ukrainian].

6. Vashchenko A.P., Stepanov G.V., Safarov E.G.(1987). Dynamichnyy opir konstruktsiynykh materialiv zrizu [Dynamic shear resistance of structural materials]. *Problemy mitsnosti*, [in Ukrainian].

7. Stepanov G.V. Safarov E.G. (1988). Author's certificate "Method of dynamic testing of materials" No. 1434321.

E.Safarov, O.Romaniuk, O.Smachylo, Mechanical properties of polyamides under dynamic loading

The development of modern technologies requires the use of new innovative materials. PA series polyamides, which belong to thermoplastic polymers, are widely used in structural elements of automobiles due to their strength, wear resistance, resistance to chemicals and heat resistance. The heat resistance of polyamide is extremely in demand in the engine compartment, where long-term operation at high temperatures is required from plastic. Glass-filled polyamides, which are close in properties to ceramics, are used in the production of sockets and switches. Isotropic shrinkage polyamides are used for precision casting in electronics. In this regard, there is a need to determine the dynamic mechanical characteristics of polyamides.

The following grades of polyamides were taken as objects of research: PA 610 (fuel and oil pipes (automotive industry), cable sheaths, sports equipment), PA 610-RM (parts requiring increased strength or heat resistance, insulation in electrical engineering, friction units with a low coefficient of friction), PA 6-LT-U1-RM (structural parts, gears, bearings, electrical housings, automotive components), PA66 - 2 (friction units, gears, terminal blocks, sockets), PA66-2RM (units with high mechanical load, parts with constant operation at elevated temperatures, insulating materials, guide bushings). PA6-LT-SVU2 (TU 6-05-211-1411-85), PA66-1-L-SV30(TU 6-05-211-1424-86).

This article describes the results of dynamic compression tests of polyamides.

Key words: polyamide, electrical materials, automotive transport, modern mechanical engineering, insulating materials, impulse loading, dynamic tests, tribotechnics.

САФАРОВ Елман Гасанбей огли, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та соціальної безпеки, Інженерно-технологічний інститут Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна», e-mail: elman19.60.07@gmail.com, ORCID 0000-0002-4584-5539

РОМАНЮК Оксана Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та соціальної безпеки, Інженерно-технологічний інститут Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна», e-mail: knutdromanuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9774-9875

СМАЧИЛО Оксана Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та соціальної безпеки, Інженерно-технологічний інститут Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна», e-mail: oksana.sma79@gmail.com, ORCID 0009-0001-9875-901X

Elman SAFAROV, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Road Transport and Social Security, Engineering and Technology Institute of the Open International University of Human Development "Ukraine", e-mail: elman19.60.07@gmail.com, ORCID 0000-0002-4584-5539

Oksana ROMANIUK, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Road Transport and Social Security, Engineering and Technology Institute of the Open International University of Human Development "Ukraine" , e-mail: knutdromanuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9774-9875

Oksana SMACHYLO, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Road Transport and Social Security, Engineering and Technology Institute of the Open International University of Human Development "Ukraine" , e-mail: oksana.sma79@gmail.com, ORCID 0009-0001-9875-901X

DOI 10.36910/automash.v1i24.1744

Сахно В.П.¹, Маяк М.М.², Мурований І.С.², Котенко А.С.²¹Національний транспортний університет, м. Київ, Україна,²Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ДО ВИЗНАЧЕННЯ МАНЕВРЕНОСТІ ШАРНІРНО-З'ЄДНАНИХ АВТОБУСІВ ІЗ САМОУСТАНОВЛЮВАЛЬНОЮ ВІССЮ ПРИЧЕПА

Автобуси відіграють важливу роль у державній транспортній системі та транспортних послугах у всьому світі. Це найпоширеніший спосіб перевезення людей на короткі та середні відстані у містах, а також у більшості сільських районів. Для задоволення потреб населення у перевезеннях у великих містах частка автобусів особливо великого класу повинна складати не менше 30%. Для таких автобусів основними параметрами призначення є пасажиромісткість, швидкість обміну пасажирами, динаміка розганяння, максимальна швидкість, стійкість, керованість та маневреність. Враховуючи те, що шарнірно-з'єднаний автобус (ШЗА) є засобом підвищеної небезпеки, при вирішенні проблем щодо можливості їх експлуатації у числі перших слід робити кроки у напрямку теоретичних досліджень маневреності і стійкості руху. Для визначення показників маневреності була використана доопрацьована математична модель плоскопаралельного руху ШЗА із самоустановлювальними і керованими колесами причіпної ланки.

За доопрацьованою математичною моделлю плоскопаралельного руху шарнірно-з'єданого автобуса встановлено, що ШЗА загальною довжиною 18,75 м з некерованою віссю причепа не задовольняє вимогам нормативних документів щодо маневреності ($B_r=7,349$ м > $[B_r=7,2$ м]). Разом з тим, ШЗА із самоустановлювальною віссю причепа задовольняє вимогам щодо маневреності тільки за довжини автопоїзда до 20,0 м. При збільшенні довжини ШЗА до 22,0 м, дозволеної в Україні, необхідно використовувати керовані причіпні ланки. Так, за прямого приводу управління на колеса причепа ШЗА задовольняє вимогам щодо маневреності. Такі автобуси можуть бути конкурентоспроможними у порівнянні з триланковими шарнірно-з'єднаними автобусами.

Ключові слова: шарнірно-з'єднаний автобус, причіп, маневреність, радіус повороту, габаритна смуга руху, самоустановлювальна вісь, керована вісь.

ВСТУП

Автобуси відіграють важливу роль у державній транспортній системі та транспортних послугах у всьому світі. Це найпоширеніший спосіб перевезення людей на короткі та середні відстані у містах, а також у більшості сільських районів. Автобуси часто є єдиним способом зручного переміщення людей на великі відстані для населення світу. Завдяки екологічним та економічним вигодам автобуси становлять 55% громадського транспорту в Європі, понад 45% всього пасажирського транспорту в Туреччині та 751 млн пасажирських поїздок щороку в США. На відстані від 500 до 1000 км, автобуси мають найнижчу вартість на пасажирів будь-якого виду транспорту [1]. Згідно з рекомендованими (на основі національних досліджень) нормами співвідношення між автобусами різних класів, які використовуються у великих містах, три чверті всього автобусного парку міста з населенням понад 1 млн жителів мають бути автобуси великого (тривісні 15 метрів, 45%) та особливо великого класу – шарнірно-зчленовані 30% [2]. Для таких автобусів основними параметрами призначення є пасажиромісткість, швидкість обміну пасажирами, динаміка розганяння, максимальна швидкість, стійкість, керованість, а для особливо великих міст, крім того, маневреність, зокрема необхідністю виконання вимог Приписів ЄЕК ООН №36 п.п.5.9.1. «... коли в русі на повороті праворуч, як ліворуч, автобус повинен бути повністю розміщений на крайній точці кузова або бампера в радіусі кола 12,5 м»; і 5.9.2. «... при русі на повороті праворуч, як і ліворуч, коли найбільш виступають точки тіла або бампер описують коло радіусом 12,5 м, автобус слід розташувати в коридорі 7,2 м» (Правила ISO ООН ECE R 36-03:2002). Виконання нормованих показників маневреності автобусів особливо великого класу може бути досягнуто за рахунок раціональної компоновальної схеми автобуса, а також застосуванням самоустановлювальних або керованих коліс причепа. Тому дослідження маневреності автобусів особливо великого класу є актуальним на сьогодні.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Маневреність і стійкість руху належить до властивостей автотранспортних засобів (АТЗ), що не мають строгої визначеності в термінології, вимогах, показниках і методах оцінки. На практиці використовують експериментальні характеристики, що визначають маневреність і стійкість АТЗ при русі, а в теорії – прямі і непрямі показники і їхні залежності, серед яких радіуси повороту, габаритна смуга руху, критична швидкість руху і бічні прискорення, що діють у центрі мас окремих ланок [3]. У даний час задача визначення параметрів маневреності і стійкості вантажних автопоїздів з некерованими причіпними ланками є достатньо вивченою. Так, у роботах [2,3] проведено спрощений

аналіз маневреності і стійкості комбінацій транспортних засобів, таких як тягач у поєднанні з одним або двома напівпричепами або вантажівка та повний причіп. Комбінації автомобілів розглядаються як лінійні динамічні системи з двома ступенями свободи для кожного блоку. Рівняння руху виведені з урахуванням впливу гальмування та прискорення та отримано характерне рівняння для руху з постійною швидкістю. У роботах [4,5] показано, що шарнірно зчленовані транспортні засоби демонструють нестабільні режими руху на високих швидкостях, включаючи складання, поперечні коливання причепа та перекидання. Ці нестабільні режими руху можуть призвести до смертельних випадків. З іншого боку, такі транспортні засоби мають незадовільну маневреність на низьких швидкостях. З усіх суперечливих критеріїв при проектуванні шарнірно-зчленованих машин необхідно знаходити компромісне рішення між маневреністю на низьких швидкостях і бічною стійкістю на високих швидкостях. Це є найважливішим і фундаментальним. Вирішення цієї проблеми базується на розробленому методі паралельної оптимізації конструкції шарнірно-з'єднаних автобусів (ШЗА), який застосовується до проектування автопоїздів з інтегрованими системами активної безпеки, які включають управління активним кермовим управлінням причепа, управління антиперекиданням, керування диференціальним гальмуванням та різні комбінації цих трьох стратегій управління. Конструктивні схеми транспортних засобів перевіряються за допомогою моделей програмного пакету TruckSim. Для моделювання випробувальних маневрів із замкнутим контуром розробляється модель водія, яка використовується для керування віртуальним транспортним засобом по заданому шляху. Розроблений метод ефективний для визначення бажаних параметрів конструкції транспортних засобів на ранніх етапах їх проектування із активними системами безпеки.

У роботі [3] запропонована уніфікована модель, що включає динаміку рискання і крену для будь-якої конфігурації шарнірно-з'єднаної машини з використанням реконфігурованого підходу. При цьому розглядаються усі можливі існуючі конфігурації автобусів, включаючи конфігурацію шарніру з'єднання ланок, конфігурацію трансмісії та конфігурацію активного управління шасі. Хоча фокус цієї статті — автобуси, запропонований підхід фактично охоплює будь-які багатовісні транспортні засоби, такі як багатовісні вантажівки, тягачі з причепами тощо. На основі моделі можуть бути ефективно вирішені проблеми управління, що пов'язані з відстеженням траєкторії ланок автопоїзда, забезпечення стійкості руху, контроль ковзання, запобігання перекиданню та відстеження траєкторії руху при автономному водінні.

У роботі [6] показано, що взаємозв'язки між осями і між ланками транспортних засобів з декількома причепами можуть породити специфічну коливальну поведінку причепів під час маневрів транспортних засобів. Ці коливання є прямим наслідком властивості кінематики транспортного засобу, пов'язаною із конструкцією тягово-зчіпного пристрою. На прикладі однієї пари ланок транспортних засобів визнаються закономірності її повороту, які надалі поширюються на автопоїзд з довільною кількістю причепів. Чисельні результати, отримані для кінематики трьох причепів, підтверджують теоретичні міркування, що дають певний кількісний погляд на проблему. Тому типові кінематичні моделі багатоланкових автопоїздів будуть корисними при вирішенні таких завдань, як: формальний аналіз кінематичних властивостей, швидке планування номінальних маневрів, прогноз режимів руху тощо [7-10].

Враховуючи те, що автопоїзд, у тому числі шарнірно-з'єднаний автобус, як АТЗ є засобом підвищеної небезпеки, при вирішенні проблем щодо можливості їх експлуатації у числі перших слід робити кроки у напрямку теоретичних досліджень маневреності і стійкості руху.

Розробка компактних і простих у використанні математичних моделей зчленованих транспортних засобів для планування, управління та локалізації руху стає все більш і більш важливою в епоху інтелектуальних транспортних систем, особливо коли існує потреба в надійних прогнозах руху для багатоланкових транспортних засобів різної кінематичної конструкції. У роботі [11] запропоновано модульний алгоритмічний підхід до кінематичного моделювання неголономних (багатоеlementних) зчленованих автобусів, у тому числі і вантажних транспортних засобів з п-причепами (як окремий випадок), що складається з тягового автомобіля, пасивно з'єднаного з довільною кількістю керованих і некерованих причепів та з різним розташуванням керованих осей в кінематичному ланцюгу. Кінематичні моделі дійсні за умови чистого кочення всіх коліс транспортного засобу (без ковзання/ковзання), що практично виправдано для умов маневрування на низькій швидкості. У роботі [10] представлено концепцію та аналіз стабільності системи управління зворотним зв'язком для відстеження траєкторії автопоїзда з довільною кількістю причепів, шарнірно з'єднаних між собою. Завдяки застосуванню каскадно-подібної структури управління, рішення що розглядається, є модульним і дуже масштабованим щодо кількості причепів. Формальний аналіз

замкнутої системи забезпечує достатні умови для асимптотичного відстеження сукупності так званих еталонних траєкторій як з постійною, так і змінною у часі кривизною траєкторії. Розглянутий у статті каскадний закон контролю траєкторії вирішує проблему відстеження кінематики багатоланкового автопоїзда.

Криволінійний рух автопоїзда характеризується такими режимними параметрами, як швидкість руху, радіус повороту і кути повороту керованих коліс, які в процесі експлуатації автопоїзда не залишаються постійними. Тому для оцінки маневреності АТЗ використовують як кінематичні, так і динамічні показники.

Динамічні показники забезпечуються системою «двигун-трансмсія» тягового автомобіля або автомобіля-тягача.

Кінематичні показники повинні забезпечити [12]:

- габаритну смугу руху (ГСР), рівну різниці зовнішнього і внутрішнього габаритних радіусів повороту. Зважаючи на те, що габаритні радіуси повороту нормовані ($R_{зг}=12,5$ м, $R_{вг}=5,3$ м), нормованою буде і габаритна смуга руху ($B_r=7,2$ м);
- можливість рухатися заднім ходом.

Найменш вивченим на-сьогодні є питання можливості руху автопоїзда заднім ходом, яка для багатоланкових автопоїздів теоретично майже не розглядалася. Проте для шарнірно-з'єднаних автобусів, що працюють на виділених маршрутах питання руху заднім ходом не є актуальним.

Характеристики маневреності і стійкості руху АТЗ, як відомо, визначаються комбінацією експлуатаційних, масово-геометричних і конструктивних параметрів його модулів і систем їх управління [12]. В загальному випадку бажані сполучення вказаних параметрів з точки зору маневреності і стійкості навіть для одного і того ж транспортного засобу в діапазоні експлуатаційних навантажень і швидкостей руху бувають різними. Як, наслідок, є складність отримання на ранніх стадіях створення АТЗ точних конструктивних параметрів і кількісних показників за критеріями маневреності і стійкості його руху [11,13,14]. Успіх у рішенні подібних задач залежить від того, наскільки вдало обрана математична модель і її істотні параметри, що описують поведінку динамічної системи у різних режимах руху. Для маневреності – це рівняння у плоскопаралельному русі, зважаючи на невеликі швидкості, для стійкості – просторовому русі. Так, у роботі [15] складені диференціальні рівняння плоскопаралельного руху для визначення показників маневреності і стійкості руху дволанкових автопоїздів з некерованими причіпними ланками, проте використання цих рівнянь для визначення показників маневреності шарнірно-з'єднаних автобусів може призвести до суттєвої похибки.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є порівняльна оцінка маневреності ШЗА з керованими і некерованими причіпними ланками. Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- уточнити математичну модель [15] для визначення показників маневреності шарнірно-з'єднаних автобусів;
- визначити вихідні дані для інтегрування рівнянь руху ШЗА;
- проінтегрувати рівняння руху ШЗА з некерованою і самоустановлювальною віссю причепа;
- визначити показники маневреності ШЗА з некерованою і самоустановлювальною віссю причепа;
- розробити рекомендації щодо поліпшення маневреності ШЗА.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі [15] розроблена математична модель для визначення показників маневреності і стійкості руху дволанкових автопоїздів з некерованими причіпними ланками, яка після доопрацювання записано у вигляді:

$$\begin{aligned}
 & (m + m_2)\dot{V} - [m_2 d_1 \sin \phi \dot{\omega} + m_2 l_1 \sin \phi \ddot{\phi} + m a \dot{U} + m_2 \omega (U + a c) + m_2 l_1 \times \omega_1^2 \cos \phi = \\
 & Y_1 \sin \theta_1 - X_1 \cos \theta_1 + Y_1' \sin \theta_1' - X_1' \cos \theta_1' - (X_{12} + X_{12}') + [(Y_2 + Y_2') \sin \phi - (X_2 + X_2') \cos \phi]; \\
 & (m + m_2)\dot{U} - [(m_2 + m_2 d_1 \cos \phi) \dot{\omega} + m_2 l_1 \times \cos \phi \ddot{\phi} + (m + m_2) a \dot{V} - m_2 d_1 \omega_1^2 \sin \phi = \\
 & = Y_1 \cos \theta_1 - X_1 \sin \theta_1 + Y_1' \cos \theta_1' - X_1' \sin \theta_1' + (Y_{12} + Y_{12}') + (Y_2 + Y_2') \cos \phi - (X_2 + X_2') \sin \phi; \\
 & - c m_2 \dot{U} + (l + c^2 m_2) \dot{\omega} + c m_2 d_1 \cos \phi \ddot{\phi} - c m_2 a \dot{V} + c m_2 d_1 \omega_1^2 \sin \phi = \\
 & = (X_1 \sin \theta_1 - Y_1 \cos \theta_1) (\varepsilon \sin \theta_1 + a) + (Y_1' \cos \theta_1' - X_1' \sin \theta_1' (a + \varepsilon \sin \theta_1') + (Y_1 \sin \theta_1 + X_1 \cos \theta_1) \times \\
 & \times (H + \varepsilon \cos \theta_1) - (Y_1' \sin \theta_1' + X_1' \cos \theta_1') (H + \varepsilon \cos \theta_1') - (Y_{12} + Y_{12}') b - c [(Y_2 + Y_2') \cos \phi - (X_2 + X_2') \sin \phi];
 \end{aligned}$$

$$m_2 d_1 \sin \phi \dot{\phi} + m_2 d_1 \cos \phi \dot{U} - [I_1 \dot{\omega} + (I_2 + m_2 d_1^2) \ddot{\phi}] + [V \cos \phi - (U - \omega c) \sin \phi] m_2 d_1 = (1)$$

$$= I_1 [(X_2 + X_2') \sin \phi + (Y_2 + Y_2') \cos \phi] + M_1.$$

У системі рівнянь (1) прийняті такі позначення:

m, I, m_2, I_2 – маса і центральний момент інерції автобуса і причепа відносно вертикальної осі;

θ_1, θ_1' – кут повороту правого і лівого керованих коліс автобуса;

ϕ – кут складання між автобусом і причепом;

V, U, ω – поздовжня, бокова і кутова швидкості автобуса;

M_1 – момент опору повороту причепа;

$Y_1, X_1, Y_1', X_1', X_{12}, X_{12}', Y_2, Y_2', X_2, X_2'$ – поздовжні та бокові реакції полотна дороги на колеса передньої осі (1), задньої осі (12) автобуса, осі причепа (2) для лівого і правого борту;

a – відстань від центру мас автобуса до його передньої осі;

b – відстань від центру мас автобуса до його задньої осі;

c – відстань від центру мас автобуса до точки зчипки з причепом;

d_1 – відстань від центру причепа до точки зчипки з автобусом;

l_1 – відстань від центру причепа до його осі;

H – половина колії керованих коліс автобуса;

ε – довжина цапфи керованих коліс автобуса.

Система рівнянь (1), що описує плоскопаралельний рух автопоїзда, суттєво нелінійна і її інтегрування навіть із залученням сучасної обчислювальної техніки визиває певні труднощі. Тому на першому етапі спростимо ці рівняння і приймемо, що ШЗА рухається рівномірно ($\dot{v} = \text{const}$), кути повороту зовнішнього і внутрішнього коліс автомобіля однакові ($\theta_i = \theta_i'$) і поздовжніми силами на осях ШЗА можна знехтувати $X_i = 0$, ($i = 1, 2, 3$). Визначення траєкторій центрів мас ланок автопоїзда на криволінійних ділянках шляху можливо лише безпосереднім чисельним інтегруванням нелінійної системи диференціальних рівнянь [16].

Знайдемо рішення системи (1), вважаючи що $\theta = \text{const}$ та $v = \text{const}$, причому їх величинами не можна знехтувати. За цієї умови система рівнянь руху автопоїзда (1) прийме вигляд:

$$(m + m_1)\omega v + m_1 \omega^2 c \sin \phi = Y_1 \cos \theta + Y_{12} + Y_2 \cos \phi;$$

$$-vm_1 c + m_1 \omega^2 c d_1 \sin \phi = aY_1 \cos \theta - bY_{12} - Y_2 d_1 \cos \phi;$$

$$vm_2 \omega d_1 \cos \phi - um_2 \omega d \sin \phi + m_2 \omega^2 d_1 \sin \phi = Y_2 d_1, \quad (2)$$

Вирази для подовжньої та бічної швидкості центра мас причепа запишуться у вигляді:

$$v_1 = v \cos \phi - (u - \omega c) \sin \phi, \quad u_1 = v \sin \phi + (u - \omega c) \cos \phi + \omega c_1. \quad (3)$$

Кутова швидкість причепа буде дорівнювати кутовій швидкості автобуса:

$$\omega_1 = \omega = \text{const}. \quad (4)$$

Вирази для визначення кутів відведення запишемо у вигляді:

$$\delta_1 = \theta_1 - \frac{u + \omega a}{v}, \quad \delta_2 = \frac{-u + \omega b}{v}, \quad \delta_3 = \frac{-u_1 + \omega c_1}{v_1}. \quad (5)$$

Бічні реакції на осях автопоїзда визначимо як:

$$Y_i = \frac{k_i \delta_i}{\sqrt{1 + \chi_i^2 \delta_i^2}}, \quad \chi_i = \frac{k_i}{\phi Z_i} \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

Сталим значенням u, ω, ϕ відповідає круговий рух усіх точок автопоїзда [16]. Кінематичні рівняння для визначення декартових координат характерних точок автопоїзда представимо у такий спосіб:

$$\dot{x} = v \cos(\omega t + \mathcal{G}) - u \sin(\omega t + \mathcal{G}), \quad \dot{y} = v \sin(\omega t + \mathcal{G}) + u \cos(\omega t + \mathcal{G}), \quad (7)$$

де $\mathcal{G}$ – початковий курсовий кут для автобуса, ($\mathcal{G}_1 = \mathcal{G} - \phi$) – для причепа.

Визначимо положення миттєвого центру повороту і радіус характерних точок автопоїзда. Із рівняння (7) знайдемо:

$$x = \frac{v}{\omega} \sin(\omega t + \vartheta) + \frac{u}{\omega} \cos(\omega t + \vartheta) + C_1, \quad y = \frac{v}{\omega} \cos(\omega t + \vartheta) + \frac{u}{\omega} \sin(\omega t + \vartheta) + C_2, \quad (8)$$

де C_1, C_2 постійні інтегрування.

Представимо рівняння (8) у виді:

$$x = r \cos(\omega t + \vartheta + \vartheta_1) + C_1, \quad y = r \sin(\omega t + \vartheta + \vartheta_1) + C_2. \quad (9)$$

Враховуючи, що:

$$r = \frac{\sqrt{v^2 + u^2}}{\omega}, \quad \vartheta = \arctg \frac{v}{u}, \quad (10)$$

Отримаємо:

$$(x - C_1)^2 + (y - C_2)^2 = r^2, \quad (11)$$

де радіус кола r визначається виразом (10).

Декартові координати центра цього кола визначаються як:

$$C_1 = x_0 - r \cos(\vartheta + \vartheta_1); \quad C_2 = y_0 - r \sin(\vartheta + \vartheta_1); \quad (12)$$

У такий спосіб можна одержати рівняння для всіх точок автопоїзда.

Максимальний габаритний радіус повороту:

$$R_{\text{max}} = \sqrt{(r + B_r / 2)^2 + (c' + r \tan(\theta - \delta_1))^2}, \quad (13)$$

де B_r – габаритна ширина автобуса, м;

c' – передній звис автобуса, м.

Мінімальний габаритний радіус повороту автопоїзда:

$$R_{\text{min}} = R_2 - \frac{B_{\text{II}}}{2}, \quad (14)$$

де R_2 – радіус повороту точки причепа, швидкість якої направлена уздовж його поздовжньої осі, м;

B_{II} – габаритна ширина причепа, м.

Габаритна смуга руху ШЗА:

$$B_z = R_{\text{max}} - R_{\text{min}}. \quad (15)$$

Слід зазначити, що отримати аналітичні вирази для u , ω , ϕ не представляється можливим.

Вирішити ці рівняння можливо лише чисельно, наприклад, у середовищі програми *Maple*.

Інтегрування системи рівнянь (2) виконаємо для автобуса Urbino 18 [17], коротка технічна характеристика якого наведена у табл. 1, а загальний вигляд ШЗА на рис. 1.

Таблиця 1 – Коротка технічна характеристика автобуса Urbino 18

Автобус	Urbino 18 MetroStyle
Параметри	
Довжина, L, мм	18750
База автобуса, мм	5800
Координати центру мас автобуса: -відстань від центру мас до передньої осі, мм (a) -відстань від центру мас до задньої осі, мм (a) -висота центру мас, мм (h_{ga})	4100 1700 1050
База причепа, мм	5500
Координати центру мас причепа: -відстань від центру мас до точки зчипки з автобусом, мм (d) -відстань від центру мас до осі, мм (a) -висота центру мас, мм (h_{en})	4470 2189 980
Ширина, B, мм	2550
Колія, мм: -передніх коліс -задніх коліс -коліс причепа	2175 1900 2175
Висота, H, мм	3150

Пасажиро-місткість, людей	210
Загальна маса, кг	30000
Розподіл повної маси по осям автобуса, кг:	
-передня вісь	8500
-задня вісь	11500
-вісь причепа	10000
Шини	275/70 R 22,5

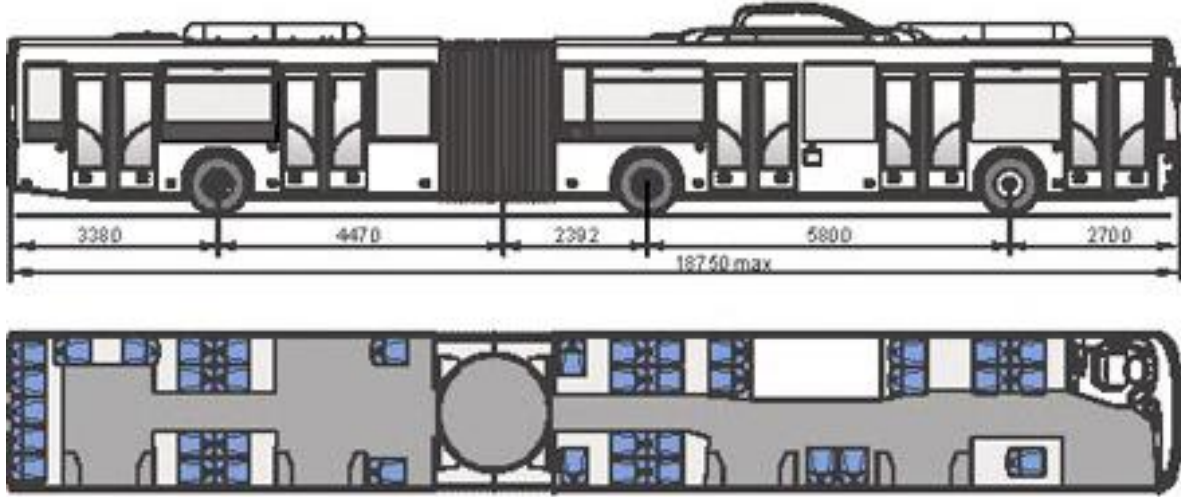


Рисунок 1 – Загальний вигляд шарнірно-зчленованого автобуса

При інтегруванні системи рівнянь (2) будемо вважати, що нормальні реакції опорної поверхні на колеса (осі) ШЗА залишаються незмінними у поздовжній площині.

Моменти інерції ланок автопоїзда визначимо у відповідності до методики, запропонованої у роботі [18].

В основу даної методики покладені два припущення: по-перше, момент інерції автомобіля залежить від закону розподілу його маси у межах колії, бази і висоти; по-друге, щільність розподілу моменту інерції підпорядковується нормальному закону розподілу.

Найбільш вірогідні значення радіуса інерції відносно:

- вертикальної осі:

$$\rho_z = \sqrt{\frac{1}{2}ab + \frac{B^2}{12} \pm \frac{1}{6}ab},$$

- повздовжньої осі:

$$\rho_x = \sqrt{\frac{1}{2}(H-h)h + \frac{B^2}{12} \pm \frac{1}{6}(H-h)h},$$

- поперечної осі:

$$\rho_y = \sqrt{\frac{1}{2}ab + \frac{1}{3}(H-h)h \pm \frac{1}{6}ab}, \quad (16)$$

За обраних компоновальних параметрів ШЗА радіуси інерції склали:

$$\begin{aligned} \rho_z &= 2,451 \text{ м}^2, & \rho_{z2} &= 1,573 \text{ м}^2, \\ \rho_x &= 1,421 \text{ м}^2, & \rho_{x2} &= 1,142 \text{ м}^2, \\ \rho_y &= 2,489 \text{ м}^2, & \rho_{y2} &= 2,124 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Момент інерції кожної з ланок автопоїзда визначиться за відомою формулою $I_i = m_i \rho_i^2$.

Тоді:

$$\begin{aligned} I_z &= 49020 \text{ кг} \times \text{м}^2, & I_{z2} &= 15730 \text{ кг} \times \text{м}^2, \\ I_x &= 28420 \text{ кг} \times \text{м}^2, & I_{x2} &= 11420 \text{ кг} \times \text{м}^2, \\ I_y &= 49780 \text{ кг} \times \text{м}^2, & I_{y2} &= 21240 \text{ кг} \times \text{м}^2. \end{aligned}$$

Для інтегрування системи рівнянь (2) до масових і компоновальних параметрів ШЗА додамо параметри, що визначають бічні сили на осях ШЗА, а саме коефіцієнти опору бічному відведенню і коефіцієнт зчеплення. Для коліс з шинами 275/70 R 22,5 коефіцієнт опору бічному відведенню складає:

- для передньої осі автобуса $k_1=160000$ Н/град;
- для задньої осі автобуса $k_2=252000$ Н/град;
- для осі причепа $k_3=165000$ Н/град.

Коефіцієнт зчеплення для усіх коліс приймаємо $\varphi=0,8$.

Початковими умовами інтегрування приймемо:

- кут повороту керованих коліс автобуса $\theta=\theta_0+k_\theta\times\theta_0$,

де θ_0 – початковий кут повороту керованих коліс автобуса, $\theta_0=0,1$ рад;

k_θ – коефіцієнт, що враховує зміну початково значення кута повороту керованих коліс автобуса, $k_\theta=0; 1; 2\dots 7$;

- швидкість руху автобусного поїзда, $v=5$ м/с.

У результаті інтегрування рівнянь руху ШЗА отримані значення кутової і бічної швидкості центру мас автобуса, а також його радіус повороту. Нижче, у якості прикладу, наведені результати розрахунку названих параметрів для ШЗА з некерованою і самоустановлювальною віссю причепа за швидкості $v=5$ м/с і кута повороту керованих коліс автобуса $\theta=0,6$.

$v=5;\theta=0,6$ { $u = -5.752830037$, $\theta = .6307735814$, $\omega = .6508509666$ };

$eigv := -1.133853950-12.11522985*I, -1.133853950+12.11522985*I, -.3806388315-1.299168602*I, -.3806388315+1.299168602*I$; (USTOJCH.).

$R=10.36450050$

$v=5;\theta=0,6$; (3-axes, 3-ja samoustanav.): { $\theta = .4331926751$, $\omega = .4626343881$, $u = -1.050027716$ };

$eigv := -20.36562839, -1.086527265-12.21346008*I, -1.086527265+12.21346008*I, -.2947570752; -.4626343881$; (USTOJCH.).

$R=9.10766915$.

Аналогічні розрахунки були виконані для усього діапазону кута повороту керованих коліс автобуса. На рис. 3 наведені результати розрахунку параметрів руху автопоїзда, зокрема радіус повороту автобуса за некерованою осі причепа, а також із самоустановлювальною віссю причепа.

Результатами розрахунку радіуса повороту автобуса були покладені у визначення максимального і мінімального радіусів повороту, а також габаритної смуги руху за виразами (13-15).

У результаті розрахунків встановлено, що для ШЗА з некерованою віссю причепа мінімальний зовнішній радіус повороту складає $R_{зг}=12,783$ м за кута повороту керованих коліс автобуса $\theta=0,8$ рад і внутрішнього габаритного радіусу повороту $R_{вг}=5,434$ м. При цьому габаритна смуга руху автобуса склала $B_r=7,349$ м, що виходить за межі допустимої [$B_r=7,2$ м].

Разом з тим, для ШЗА із самоустановлювальною віссю причепа мінімальний зовнішній радіус повороту складає $R_{зг}=12,196$ м за кута повороту керованих коліс автобуса $\theta=0,6$ рад і внутрішнього габаритного радіусу повороту $R_{вг}=5,532$ м. При цьому габаритна смуга руху автобуса склала $B_r=6,664$ м, що значно краще у порівнянні із ШЗА з некерованою віссю причепа. Використання самоустановлювальної осі причепа може забезпечити необхідні показники маневреності ШЗА значно більшої габаритної довжини.

У подальшому було прийнято збільшувати довжину ШЗА з кроком 0,5 м і визначати показники маневреності, рис.4.

Аналіз даних, рис. 4, показує, що навіть із застосуванням самоустановлювальних коліс осі причепа вимоги нормативних документів щодо маневреності тільки автобус загальною довжиною до 20,0 м забезпечує. Якщо ж орієнтуватися на загальну довжину автопоїзда на рівні 22,0 м, то ШЗА повинен мати не самоустановлювальні, а керовані колеса осі причепа.

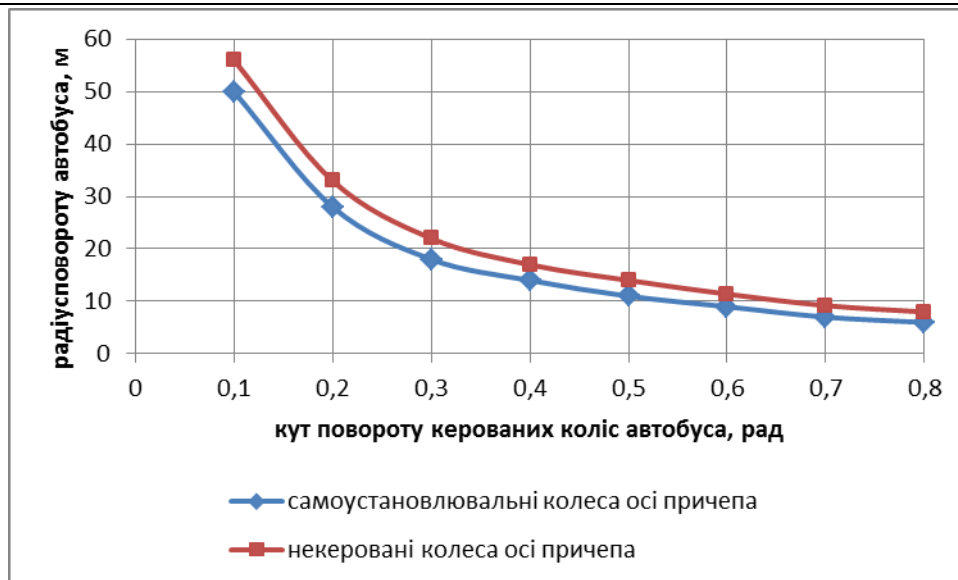


Рисунок 3 - Зміна радіусу повороту автобуса із некерованою і самоустановлювальною віссю причепа від кута повороту керованих коліс автобуса

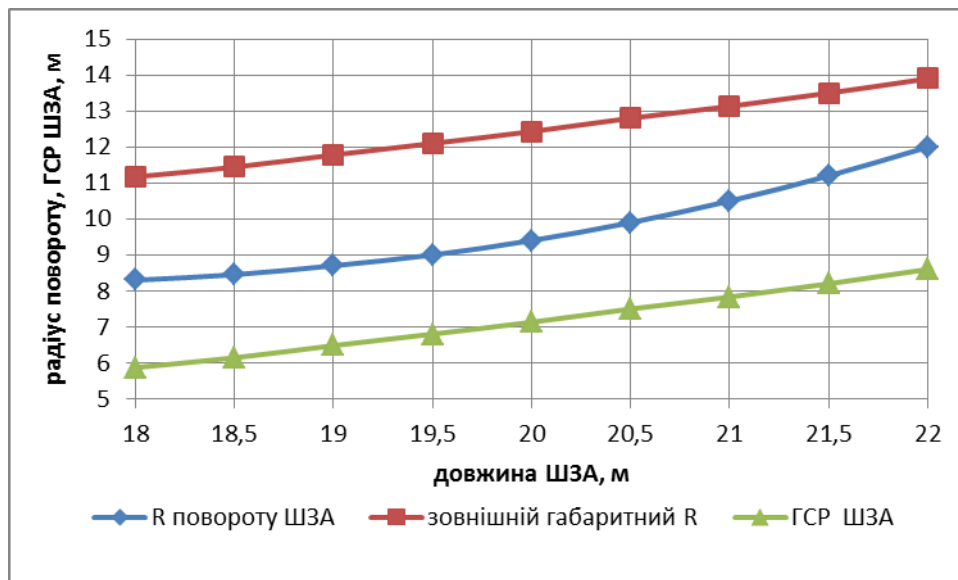


Рисунок 4 – Зміна радіусу повороту, зовнішнього габаритного радіусу і ГСР в залежності від довжини ШЗА

На сучасних автопоїздах широке застосування знайшов прямий привід управління колесами причіпних секцій, коли кут повороту їх керованих коліс визначається у прямій залежності від кута складання φ . Так, для автопоїздів збільшеної габаритної довжини пропонується передаточне відношення приводу управління в межах $U_{np}=0,3\dots0,6$ [12], тобто кут повороту керованих коліс причепа θ_1 визначиться як:

$$\theta_1 = U_{np} \times \varphi \quad (17)$$

У подальшому з урахуванням передаточного відношення приводу управління колесами причепа на рівні $U_{np}=0,5$ було проведено інтегрування вихідної системи рівнянь для автобуса загальною довжиною 22,0 м за кута повороту керованих коліс автобуса $\theta=0,7$ рад і кута повороту коліс причепа $\theta=0,5$ рад за тих же вихідних даних, що і у попередньому розділі. У результаті отримано:

$v:=5; \theta:=0.6; \theta_1:=0.5; \{\omega = .6562531317, \theta = .7265821447, \theta_1:=0.5607654321, \phi = .9910522993, u = -5.903649601\}; R = 7.6190476190.$

$v:=5; \theta_0:=0.5; \theta_1:=0.0; \{\omega = .8090822768, u = -.4236205866, \theta = .5071854856, \phi = .9894835946\};$

$v:=5; \theta_0:=0.5; \theta_1:=0.05; \{\omega = .7777840991, \phi = .8924443799, \theta = .5071395355, u = -.3105413162\};$

$v:=5; \theta_0:=0.5; \theta_1:=0.1; \{u = -.2112566819, \theta = .5072216418, \phi = .7935569179, \omega = .7487882068\};$

$v:=5; \theta_0:=0.5; \theta_1:=0.15; \{\omega = .7215368323, \phi = .6932104155, u = -.1227736547, \theta = .5074086434$

$v:=5; \theta_0:=0.5; \theta_1:=0.2; \{\omega = .6955604842, u = -.4276641354e-1, \theta = .5076843627, \phi = .5916011883\};$

$v:=10; \theta_0:=0.5; \theta_1:=0.0; \{u = -5.507412945, \theta = .5264672869, \phi = .1738218039, \omega = .6517770133$

$v:=10; \theta_0:=0.5; \theta_1:=0.1; \{\omega = .6562531317, \theta = .5265821447, \phi = .6110522993e-1, u = -5.903649601\}$

За внутрішнього габаритного радіусу повороту ШЗА на рівні $R_{вг}=5,3$ м зовнішній габаритний $R_{зг}=12,394$ габаритна смуга руху склала $B_r=7,094$ м, тобто такий автобус уже задовольняє вимогам нормативних документів щодо маневреності.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для задоволення потреб населення у перевезеннях у великих містах частка автобусів особливо великого класу повинна складати не менше 30%. Для таких автобусів основними параметрами призначення є пасажиромісткість, швидкість обміну пасажиромістами, динаміка розганяння, максимальна швидкість, стійкість, керованість та маневреність. Враховуючи те, що шарнірно-з'єднаний автобус є засобом підвищеної небезпеки, при вирішенні проблем щодо можливості їх експлуатації у числі перших слід робити кроки у напрямку теоретичних досліджень маневреності і стійкості руху. Успіх у рішенні подібних задач залежить від того, наскільки вдало обрана математична модель і її істотні параметри, що описують поведінку динамічної системи у різних режимах руху. Для маневреності – це рівняння у плоскопаралельному русі, зважаючи на невеликі швидкості, для стійкості – просторовому русі.

У відомих на сьогодні роботах складені диференціальні рівняння плоскопаралельного руху для визначення показників маневреності і стійкості руху дволанкових автопоїздів з некерованими причіпними ланками, проте використання цих рівнянь для визначення показників маневреності шарнірно-з'єднаних автобусів з керованими причіпними ланками може призвести до суттєвої похибки. У зв'язку з цим у даному дослідженні була використана доопрацьована математична модель плоскопаралельного руху ШЗА із самоустановлювальними і керованими колесами причіпної ланки.

У результаті інтегрування рівнянь руху ШЗА отримані значення кутової і бічної швидкості центру мас автобуса, а також його радіус повороту. Результати розрахунків радіуса повороту автобуса були покладені у визначення максимального і мінімального радіусів повороту, а також габаритної смуги руху (ГСР). При цьому встановлено, що для ШЗА з некерованою віссю причепа мінімальний зовнішній радіус повороту складає $R_{зг}=12,783$ м, внутрішній габаритний радіус $R_{вг}=5,434$ м і ГСР $B_r=7,349$ м, що виходить за межі допустимої [$B_r=7,2$ м]. Разом з тим, для ШЗА із самоустановлювальною віссю причепа мінімальний зовнішній радіус повороту складає $R_{зг}=12,196$ м, внутрішній габаритний радіус повороту $R_{вг}=5,532$ м і ГСР $B_r=6,664$ м, що значно менше допустимої. Проте використання самоустановлювальної осі причепа може забезпечити необхідні показники маневреності тільки для ШЗА загальною довжиною до 20,0 м.

Якщо ж орієнтуватися на загальну довжину автопоїзда на рівні 22,0 м, що дозволено в Україні, то ШЗА повинен мати не самоустановлювальні, а керовані колеса осі причепа. За прямого приводу управління на колеса осі причепа і передаточному відношенні приводу 0,5 за внутрішнього габаритного радіусу повороту ШЗА на рівні $R_{вг} = 5,3$ м зовнішній габаритний склав $R_{зг}=12,394$ і ГСР $B_r=7,094$ м, тобто такий автобус уже задовольняє вимогам нормативних документів щодо

маневреності.

ВИСНОВКИ

За доопрацьованою математичною моделлю плоскопаралельного руху шарнірно-з'єднаного автобуса встановлено:

- ШЗА загальною довжиною 18,75 м з некерованою віссю причепа не задовольняє вимогам нормативних документів щодо маневреності ($B_r=7,349 \text{ м} > [B_r=7,2 \text{ м}]$);
- ШЗА із самоустановлювальною віссю причепа задовольняє вимогам щодо маневреності тільки за довжини автопоїзда до 20,0 м;
- ШЗА з керованою віссю причепа за прямого приводу управління на його колеса задовольняє вимогам щодо маневреності для автопоїзда загальною довжиною до 22 м, що дозволені для експлуатації в Україні. Такі автобуси можуть бути конкурентоспроможними у порівнянні з триланковими шарнірно-з'єднаними автобусами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Zhang, Y., Khajepour, A., & Huang, Y. (2018). Multi-axle/articulated bus dynamics modeling: A reconfigurable approach. *Vehicle System Dynamics*, 56(9), 1315–1343. <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1420205>
- 2.Sakhno, V. P., Polyakov, V. M., Murowanyi, I. S., & Stelmashchuk, V. V. (2016). Determination of movement stability of especially large class hybrid bus with active trailer. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 49(2), 107–118.
- 3.Sakhno, V., Kravchenko, O., Korpach, A., Korpach, O., Bosenko, V., Dižo, J., & Blatnický, M. (2024). The choice and reasoning of the bus rapid transit systems for city transport. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 123, 259–275. <https://doi.org/10.20858/Sjsutst.2024.123.13>
- 4.Schmid, I. (1968). Engineering approach to truck and tractor train stability. *SAE Transactions*, 76(1), 1–26. <https://www.jstor.org/stable/44553453>
- 5.Islam, M. M. (2013). Parallel design optimization of multi-trailer articulated heavy vehicles with active safety systems (Doctoral dissertation, University of Ontario Institute of Technology).
- 6.Gottmann, F., Wind, H., & Sawodny, O. (2018). On the influence of rear axle steering and modeling depth on a model-based racing line generation for autonomous racing. In *IEEE CCTA* (pp. 846–852). Copenhagen.
- 7.Sakhno, V., et al. (2023). To the comparative evaluation of three-unit lorry convoys of the different component systems by maneuverability. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 121. <https://doi.org/10.20858/Sjsutst.2023.121.12>
- 8.Ljungqvist, O., Evestedt, N., Axehill, D., Cirillo, M., & Pettersson, H. (2019). A path planning and path-following control framework for a general 2-trailer with a car-like tractor. *Journal of Field Robotics*, 36(8), 1345–1377.
- 9.Gonzalez, D., Perez, J., Milanes, V., & Nashashibi, F. (2016). A review of motion planning techniques for automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(4), 1135–1145.
- 10.Tian, X., He, R., Sun, X., Cai, Y., & Xu, Y. (2019). An ANFIS-based ECMS for energy optimization of parallel hybrid electric bus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2960593>
- 11.Michalek, M. M. (2015). Modular tracking controller for n-trailers with non-zero hitching offsets. *Proceedings of the 2015 American Control Conference* (pp. 5371–5376). Chicago, USA.
- 12.Поляков, В. М., Сахно, В. П. (2013). Триланкові автопоїзди. Маневреність. Київ: Національний транспортний університет.
- 13.Leduc, G. (2009). Longer and heavier vehicles: An overview of technical aspects (Technical Report EUR 23949 EN). Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Luxembourg.
- 14.Michalek, M. M. (2015). Modular tracking controller for n-trailers with non-zero hitching offsets. *Proceedings of the 2015 American Control Conference* (pp. 5371–5376). Chicago, USA.
- 15.Sakhno, V., Kravchenko, O., Poljakov, V., Chovcha, I., Dižo, J., & Blatnický, M. (2024). Maneuverability and stability of an articulated bus for bus rapid transit system. 15th International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive, and Railway Engineering and Technologies (BulTrans-2023). <https://doi.org/10.1063/5.0201443>

- 16.Sakhno, V., Gerlici, J., Kravchenko, O., Poljakov, V., Chovcha, I., & Dižo, J. (2023). *Manévrovateľnosť a stabilita pohybu kĺbového autobusu, systém HST*. Žilinská univerzita v Žiline. <https://doi.org/10.26552/tech.C.2023.1.5>
- 17.Міський автобус SOLARIS URBINO 18. Retrieved from <https://avtek.ua/ua/p-urbino-18>
- 18.Волков В.П. (2003). *Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля: Навчальний посібник*. Харків: ХНАДУ.

REFERENCES

- 1.Zhang, Y., Khajepour, A., & Huang, Y. (2018). Multi-axle/articulated bus dynamics modeling: A reconfigurable approach. *Vehicle System Dynamics*, 56(9), 1315–1343. <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1420205>
- 2.Sakhno, V. P., Polyakov, V. M., Murowanyi, I. S., & Stelmashchuk, V. V. (2016). Determination of movement stability of especially large class hybrid bus with active trailer. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 49(2), 107–118.
- 3.Sakhno, V., Kravchenko, O., Korpach, A., Korpach, O., Bosenko, V., Dižo, J., & Blatnický, M. (2024). The choice and reasoning of the bus rapid transit systems for city transport. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 123, 259–275. <https://doi.org/10.20858/Sjsutst.2024.123.13>
- 4.Schmid, I. (1968). Engineering approach to truck and tractor train stability. *SAE Transactions*, 76(1), 1–26. <https://www.jstor.org/stable/44553453>
- 5.Islam, M. M. (2013). *Parallel design optimization of multi-trailer articulated heavy vehicles with active safety systems* (Doctoral dissertation, University of Ontario Institute of Technology).
- 6.Gottmann, F., Wind, H., & Sawodny, O. (2018). On the influence of rear axle steering and modeling depth on a model-based racing line generation for autonomous racing. In *IEEE CCTA* (pp. 846–852). Copenhagen.
- 7.Sakhno, V., et al. (2023). To the comparative evaluation of three-unit lorry convoys of the different component systems by maneuverability. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 121. <https://doi.org/10.20858/Sjsutst.2023.121.12>
- 8.Ljungqvist, O., Evstedt, N., Axehill, D., Cirillo, M., & Pettersson, H. (2019). A path planning and path-following control framework for a general 2-trailer with a car-like tractor. *Journal of Field Robotics*, 36(8), 1345–1377.
- 9.Gonzalez, D., Perez, J., Milanes, V., & Nashashibi, F. (2016). A review of motion planning techniques for automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(4), 1135–1145.
- 10.Tian, X., He, R., Sun, X., Cai, Y., & Xu, Y. (2019). An ANFIS-based ECMS for energy optimization of parallel hybrid electric bus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2960593>
- 11.Michalek, M. M. (2015). Modular tracking controller for n-trailers with non-zero hitching offsets. *Proceedings of the 2015 American Control Conference* (pp. 5371–5376). Chicago, USA.
- 12.Polyakov V. M., Sakhno V. P. (2013). *Trylankovi avtopoizdy. Manevrenist [Three-unit road trains. Maneuverability]*. Kyiv: Natsionalnyi transportnyi universytet (in Ukrainian).
- 13.Leduc, G. (2009). *Longer and heavier vehicles: An overview of technical aspects* (Technical Report EUR 23949 EN). Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Luxembourg.
- 14.Michalek, M. M. (2015). Modular tracking controller for n-trailers with non-zero hitching offsets. *Proceedings of the 2015 American Control Conference* (pp. 5371–5376). Chicago, USA.
- 15.Sakhno, V., Kravchenko, O., Poljakov, V., Chovcha, I., Dižo, J., & Blatnický, M. (2024). Maneuverability and stability of an articulated bus for bus rapid transit system. 15th International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive, and Railway Engineering and Technologies (BulTrans-2023). <https://doi.org/10.1063/5.0201443>
- 16.Sakhno, V., Gerlici, J., Kravchenko, O., Poljakov, V., Chovcha, I., & Dižo, J. (2023). *Manévrovateľnosť a stabilita pohybu kĺbového autobusu, systém HST*. Žilinská univerzita v Žiline. <https://doi.org/10.26552/tech.C.2023.1.5>
- 17.City Bus SOLARIS URBINO 18. Retrieved from <https://avtek.ua/ua/p-urbino-18>
- 18.Volkov V. P. (2003). *Teoriia ekspluatatsiynykh vlastyvostei avtomobilia: Navchalnyi posibnyk [Theory of operational properties of the automobile: Textbook]*. Kharkiv: KhNADU (in Ukrainian).

V. Sakhno, M. Maiak, I. Murovanyi, A. Kotenko. To the Determination of Maneuverability of Articulated Buses with a Self-Steering Trailer Axle

Buses play an important role in the public transport system and transport services around the world. This is the most common way of transporting people over short and medium distances in cities, as well as in most rural areas. To meet the needs of the population in transportation in large cities, the share of buses of a particularly large class should be at least 30%. For such buses, the main parameters of the purpose are passenger capacity, passenger exchange rate, acceleration dynamics, maximum speed, stability, controllability and maneuverability. Considering that an articulated bus (ABS) is a means of increased danger, when solving problems regarding the possibility of their operation, steps should be taken in the direction of theoretical studies of maneuverability and stability of movement. To determine maneuverability indicators, a refined mathematical model of plane-parallel movement of ABS with self-installing and steered trailer wheels was used.

According to the refined mathematical model of the plane-parallel motion of an articulated bus, it was established that a semi-trailer with a total length of 18.75 m with an unsteering trailer axle does not meet the requirements of regulatory documents for maneuverability ($B_g=7.349\text{ m} > [B_g=7.2\text{ m}]$). At the same time, a semi-trailer with a self-installing trailer axle meets the maneuverability requirements only for a road train length of up to 20.0 m. When increasing the length of the semi-trailer to 22.0 m, which is permitted in Ukraine, it is necessary to use steered trailer links. Thus, with direct drive control to the trailer wheels, the semi-trailer meets the maneuverability requirements. Such buses can be competitive in comparison with three-link articulated buses.

Keywords: articulated bus, trailer, maneuverability, turning radius, clearance lane, self-installing axle, steered axle.

САХНО Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>

МАЯК Микола Михайлович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна, mayak@lutsk-ntu.com.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8626-3084>

МУРОВАНИЙ Ігор Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії Луцького національного технічного університету, e-mail: igor_lntu@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-9749-980X>

КОТЕНКО Андрій Степанович, аспірант 2 року навчання кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна, e-mail: kotenko.a0015@lntu.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0004-5506-9985>

Volodymyr SAKHNO, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Automobiles Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>

Mykola MAIAK, Doctor of Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Luts National Technical University, Lutsk, Ukraine, e-mail: mayak@lutsk-ntu.com.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8626-3084>

Igor MUROVANYI, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical Engineering, Luts National Technical University, e-mail: igor_lntu@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-9749-980X>

Andrii KOTENKO, Second-year graduate student of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Luts National Technical University, Lutsk, Ukraine, e-mail: kotenko.a0015@lntu.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0004-5506-9985>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1745

ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ МІЖНАРОДНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ НА ОСНОВІ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ЛОГІСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

У статті досліджено вплив закономірностей розподілу логістичних параметрів на процес формування стратегії управління міжнародними вантажними перевезеннями. Здійснено аналіз сучасних викликів у сфері логістики міжнародних перевезень, зокрема вплив нестабільного попиту, екологічних вимог, браку водіїв та інфраструктурних обмежень. Розглянуто роль логістичних компаній у забезпеченні ефективності перевезень, зосереджено увагу на впровадженні інновацій, цифрових інструментів і штучного інтелекту.

На основі реальних даних логістичної компанії України за маршрутом «Варшава – Київ» визначено статистичні закономірності для ключових параметрів (кількість заявок, обсяг вантажу, вартість і час доставки, відстань перевезення). Для кожного параметра встановлено відповідний закон розподілу. Проведена статистична перевірка підтвердила їхню достовірність, що дозволяє використовувати ці закономірності у процесі моделювання та планування логістичних процесів. Запропоновано підходи до використання отриманих результатів для прогнозування, оптимізації ресурсів і розробки стратегій розвитку логістичних підприємств.

Ключові слова: міжнародні вантажні перевезення, логістична стратегія, розподіл логістичних параметрів, статистичний аналіз, цифрові технології, оптимізація перевезень, штучний інтелект

ВСТУП

Міжнародні вантажні перевезення є важливим елементом глобальної економіки, адже вони забезпечують ефективний обіг товарів між країнами та континентами, сприяючи розвитку торгівлі та економічних зв'язків. В умовах глобалізації та інтеграції ринків роль логістичних компаній у забезпеченні ефективності та швидкості міжнародних перевезень набуває все більшого значення. Особливо це актуально для перевезень між Польщею та Україною, адже ці країни є важливими партнерами в міжнародній торгівлі, а Київ є важливим транспортним хабом для товарів, що надходять з Європи.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В умовах нестабільного попиту на перевезення та різноманітності вантажів, що транспортуються, виникає необхідність оптимізації логістичних процесів для досягнення максимальної ефективності перевезень. Одним із способів такої оптимізації є аналіз факторів, що впливають на ефективність організації міжнародних перевезень, та визначення закономірностей, які дозволяють більш точно передбачити результати в залежності від різних умов, таких як обсяг вантажу, тип товару, час доставки, вибір транспортного засобу (ТЗ) та інші.

Актуальність дослідження полягає в необхідності розробки ефективних методів оцінки та оптимізації міжнародних вантажних перевезень (МВП), що дозволяють знизити витрати, покращити якість обслуговування клієнтів і підвищити ефективність транспортних процесів. Визначення закономірностей у розподілі параметрів, таких як кількість заявок на перевезення, обсяг вантажу, час доставки, та інші параметри, є важливим кроком для удосконалення логістичних процесів, а також для розробки математичних моделей, які допоможуть у прогнозуванні та прийнятті рішень у сфері міжнародних перевезень.

Впровадження логістичних інструментів дозволяє досягати значного економічного, соціального та екологічного ефекту. Ці аспекти є важливими при оцінці ефективності міжнародних перевезень, оскільки врахування витрат на паливо, екологічний вплив транспорту, а також соціальної складової, можуть значно змінити кінцеві результати перевезень.

Логістичні компанії (ЛК) відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності МВП. Вони координують різні етапи перевезень, організовують транспортування, митні процедури, складування та розподіл товарів. Від їхнього досвіду та кваліфікації також залежить оптимізація ланцюга постачань, а також здатність до реагування на зміни в попиті або обсягах вантажів [1].

Важливу роль відіграє впровадження сучасних технологій та інновацій у роботу ЛК. Використання автоматизованих систем для відстеження вантажів, оптимізація маршрутів, а також застосування екологічно чистих технологій у транспортуванні дозволяють знижувати витрати, підвищувати ефективність і зменшувати вплив на навколишнє середовище.

ЛК повинні бути здатні адаптувати свої стратегії до постійно змінюваних умов, таких як

глобальні економічні кризи, зміни в митних або торгових угодах, а також зміни в попиті та обсягах перевезень. Це включає гнучкість у виборі перевізників, способів доставки, типів вантажів, маршрутів і транспортних засобів, що використовуються для перевезень.

Для досягнення максимальної ефективності ЛК повинні активно співпрацювати з іншими учасниками ринку, включаючи постачальників послуг з транспортування, митні органи, склади та кінцевих споживачів товарів. Це дозволяє скоротити час доставки, мінімізувати затримки та покращити загальну ефективність ланцюга постачання (ЛП).

Оптимізація ЛП є ключовим завданням для досягнення цілей сталого розвитку (ЦСР), адже саме логістика сприяє ефективності міжнародної торгівлі та економічному розвитку. ЦСР встановлені Організацією Об'єднаних Націй у 2015 році, є глобальними орієнтирами, спрямованими на досягнення сталого розвитку в усьому світі [1].

Світовий банк розробив індекс логістичної ефективності (LPI), який оцінює ефективність логістики на основі інфраструктури, митних процедур, своєчасності перевезень та компетентності логістичних служб. LPI також служить важливим індикатором сталості логістичної системи національного та міжнародного рівня [1, 2].

В роботі [1] мова йде про інтеграцію штучного інтелекту (ШІ) у логістичні процеси демонструє значний потенціал у підвищенні операційної ефективності та екологічної відповідальності. Зокрема, технології ШІ дозволяють точніше прогнозувати попит, оптимізувати транспортні маршрути та зменшувати витрати, пов'язані із запасами [3]. Компанії, які першими впровадили інструменти ШІ, досягли скорочення витрат на логістику до 15 %, зменшення рівня запасів до 35 % та підвищення ефективності обслуговування до 65 % [4].

Наприклад компанія Uber Freight використовує машинне навчання для створення алгоритмічної цінової моделі та визначення ефективних маршрутів доставки. Це дозволяє знизити відсоток порожніх пробігів вантажівок із 30 % до 15 %, зменшуючи витрати на паливе та вплив на екологію [4, 5].

Застосунок Generative AI передбачає попит, ризики та визначає оптимальний розподіл ресурсів. Він використовується для аналізу даних у реальному часі, допомагаючи приймати обґрунтовані рішення в ЛП [6].

Також ШІ використовується для створення персоналізованих повідомлень про доставку, що забезпечує прозорість і підвищує задоволеність клієнтів. Це сприяє покращенню лояльності до бренду.

За допомогою ШІ можна автоматизувати створення та аналіз логістичної документації, зменшуючи адміністративне навантаження та мінімізуючи ризик помилок [7].

Інтеграція технологій ШІ в управління ЛП сприяє зменшенню викидів, зменшенню використання ресурсів та негативного впливу на навколишнє середовище, що відповідає ЦСР [5].

Аналіз джерел [8 - 10] дозволив згрупувати фактори, що впливають на ефективність міжнародних перевезень ЛК:

- оптимізація маршрутів – сприяє зниженню витрат пального та мінімізує порожні пробіги, застосування систем GPS – дозволяє моніторити та коригувати маршрути;

- фактори, що визначають енергоефективність ТЗ та оптимальне завантаження для зменшення викидів і підвищення екологічності перевезень: використання ТЗ із низьким споживанням пального (електровантажівки), технологій для визначення оптимальної ваги й об'єму завантаження, зменшення витрат пального через правильне обслуговування техніки;

- фактори урахування операційних ризиків, таких як коливання попиту, перебоїв в логістичних ланцюгах та впровадження стратегій для їх пом'якшення: створення резервних планів для випадків затримок або перебоїв, впровадження програм для прогнозування попиту, використання даних для аналізу потенційних ризиків;

- використання аналітичних інструментів, таких як прогнозна аналітика та ШІ для вдосконалення управління ЛП;

- фактори покращення комунікації та співпраці між учасниками ЛП, включаючи перевізників, виробників і отримувачів товарів, для досягнення кращої синхронізації та зменшення витрат (платформи для інтеграції інформації між перевізниками, постачальниками й отримувачами, використання автоматизованих систем для моніторингу доставок у реальному часі, підтримка прозорості через регулярне оновлення статусу доставки);

- фактори, що сприяють дотриманню стандартів сталого розвитку та зменшення впливу на довкілля через оптимізацію логістичних процесів (використання екологічно безпечних ТЗ,

скорочення викидів парникових газів через оптимізацію ЛП, використання матеріалів, що піддаються переробці, для упаковки та перевезення);

– використання Data Envelopment Analysis (DEA) для оцінки ефективності компаній порівняно з еталонними показниками, що дозволяє виявляти слабкі сторони та покращувати загальну продуктивність (порівняння ефективності різних транспортних компаній, ідентифікація вузьких місць у ЛП, розробка рекомендацій для підвищення продуктивності компанії на основі аналізу) [8].

Також варто відміти фактори зазначені у Національній транспортній стратегії України до 2030 року [11]:

– інтеграція українського транспортного законодавства з європейськими транспортними стандартами;

– модернізація та розбудова транспортної інфраструктури, зокрема для мультимодальних вантажних перевезень (удосконалення залізничного та дорожнього рухомого складу для високошвидкісних перевезень);

– безпека та екологічність за міжнародними стандартами, що сприятиме сталому розвитку вантажних перевезень;

– міжрегіональна інтеграція та логістична взаємодія за рахунок створення єдиного транспортного простору, в якому буде ефективно інтегрована інфраструктура національного та регіонального рівнів, а також інфраструктура вантажовласників.

В роботі [12] також докладно проаналізовано фактори, що впливають на ефективність міжнародного вантажного транспорту, зокрема на прикладі Тернопільської області України. Аналіз зосереджується як на позитивних, так і негативних внутрішніх та зовнішніх факторах, які впливають на роботу місцевих перевізників:

– геополітичне розташування (через Тернопіль проходять важливі міжнародні автошляхи Е 50 та Е 85, що надає конкурентні переваги для місцевих транспортних компаній);

– продовження будівництва нової об'їзної дороги навколо Тернополя в рамках програми «Велике будівництво», що поліпшить логістичну інфраструктуру регіону та сприятиме додатковим перевагам місцевим перевізникам;

– цифровізація та логістичні технології: електронний документообіг, цифрова логістика та геолокаційні системи.

Автори [12] наводять і виклики, які гальмують ефективність перевезень:

– затримки на кордонах (можуть сягати кількох днів, створюючи незручності як для перевізників, так і для клієнтів);

– дефіцит дозволів (зокрема польських, що обмежує обсяг транзитних вантажів по важливому транзитному маршруту до ЄС);

– брак водіїв. Різке скорочення кількості водіїв на дальні рейси в Європі призвело до відтоку водіїв з українських компаній, що впливає на здатність задовольняти транспортні потреби;

– конкуренція. Зростаюча конкуренція з боку перевізників інших регіонів України, особливо тих, що розташовані ближче до європейських кордонів, ускладнює роботу перевізників Тернопільщини.

В цій же роботі [12] запропоновано алгоритм визначення економічної ефективності підприємств сегменту МВП: аналіз економічної ситуації підприємства по обраному сегменту, формування набору вихідних даних, вибір стратегії (стратегія розвитку, стратегія стабілізації, стратегія виживання), формування банку даних математичних моделей визначення ефективності перевезень, визначення економічної ефективності обраної стратегії, запровадження обраної стратегії у діяльність підприємства.

Автори [13] представляють метод оцінки попиту на міські вантажоперевезення за допомогою різних ймовірнісних розподілів, підібраних для кожної категорії комерційних об'єктів на основі даних про щотижневу кількість доставок. Метод дозволяє прогнозувати попит навіть за обмеженої кількості даних, застосовуючи Монте-Карло моделювання. Дослідження є корисним з точки зору статистичного підходу, проте не є безпосередньо релевантним для даного аналізу, оскільки зосереджене на міських поставках у роздрібній торгівлі, а не на міжнародних вантажних перевезеннях з іншими характеристиками попиту.

У дослідженні авторів [14] розглядається фактор надійності громадського транспорту через аналіз умовного закону розподілу часу поїздки. Автори емпірично порівнюють ймовірнісні моделі оцінки щільності розподілу, лог-логістичним розподілом. Найкраща з моделей зменшила середньоквадратичну похибку на 9% порівняно з базовим методом. Робота є цінною з точки зору

моделювання розподілу часу поїздки та оцінки його впливу на надійність перевезень. Водночас, отримані закономірності стосуються пасажирських перевезень у міських умовах і базуються на даних автобусної мережі Монреаля, тому не можуть бути безпосередньо застосовними до аналізу міжнародних вантажних перевезень.

У роботі [15] запропоновано статистичний підхід до оцінки вантажних активностей та ланцюгів перевезення товарів на основі пасивно зібраних GPS-даних вантажних автомобілів. Автори класифікують зупинки транспортних засобів за типами діяльності (доставка, відпочинок, дозаправка тощо) та визначають тип вантажу за географічною прив'язкою до зупинок. Для моделювання тривалості зупинок використовуються розподіли часу стоянки та відстані до найближчої дороги, які відображають середнє значення та стандартне відхилення тривалості активностей. Попри цінність підходу до обробки GPS-даних і отримання характеристик вантажних операцій, результати дослідження ґрунтуються виключно на даних внутрішніх перевезень в одній країні й не охоплюють міжнародні логістичні процеси. Це обмежує можливість їх прямого використання в контексті даного аналізу.

Проведений аналіз дає всебічне розуміння того, як географічні переваги, розвиток інфраструктури та впровадження цифрових інструментів та стратегій розвитку логістичних підприємств сприяють підвищенню конкурентоспроможності та ефективності вантажних перевезень, проте обмежена кількість досліджень присвячена закономірностям розподілу параметрів, що безпосередньо впливають на ефективність організації МВП.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи полягає у визначенні закономірності розподілу параметрів, що впливають на ефективність організації МВП, з подальшим застосуванням для оцінки та оптимізації логістичних процесів.

Задачі дослідження направлені на: аналіз сучасного стану організації МВП, зокрема роль логістичних компаній та визначення закономірностей у розподілах випадкових величин при здійсненні міжнародних перевезень.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Описаний алгоритм у роботі [12] може бути взятий за основу при формуванні математичної моделі, яка враховуватиме кількість заявок на перевезення, розмір партії, вартість, час та відстань доставки. Але спочатку доцільно визначити типи закономірностей виділених параметрів.

Обговорення результатів дослідження

Для дослідження закономірностей взято дані роботи однієї з логістичних компаній України протягом 2024 року. Обрані маршрути перевезення «Варшава – Київ», «Томашів – Київ». Перевірка відповідності законів розподілу перевірялась двома критеріями Колмогорова-Смирнова та χ^2 Пірсона. Зведена інформація по отриманим закономірностям досліджених параметрів наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Зведені результати перевірки законів розподілу досліджуваних параметрів

Параметр	Розподіл	Критерій згоди		Рівень значущості Пірсона, %	Параметри	
		Колмогорова-Смирнова	Пірсона		Математичне сподівання	Дисперсія
Кількість заявок, од.	Логнормальний	0,098	1,542	46,2	1,7	0,35
Розмір партії, кг	Нормальний	0,057	3,964	78,3	1059	20856
Вартість доставки, грн	Гама	0,095	29,173	0	30110	6517259
Час доставки, дні	Гама	0,065	5,749	1,6	7,3	0,81
Відстань доставки, км	Прямокутний	0,019	-	0	748	910,4

Перевірка відповідності емпіричних даних теоретичним розподілам за критерієм Колмогорова-Смирнова показала, що всі досліджувані параметри узгоджуються з відповідними законами, оскільки р-значення у всіх випадках перевищують 0,2. За критерієм χ^2 Пірсона підтвердження було отримано лише для трьох параметрів: кількості заявок на перевезення, розміру партії та часу доставки. Враховуючи, що критерій Колмогорова-Смирнова є точнішим, а критерій Пірсона – наближеним,

можна вважати гіпотези про відповідність емпіричних даних обраним законам розподілу загалом підтвердженими.

Результат побудови теоретичних кривих та гістограм розподілу наведені на рисунку 1.

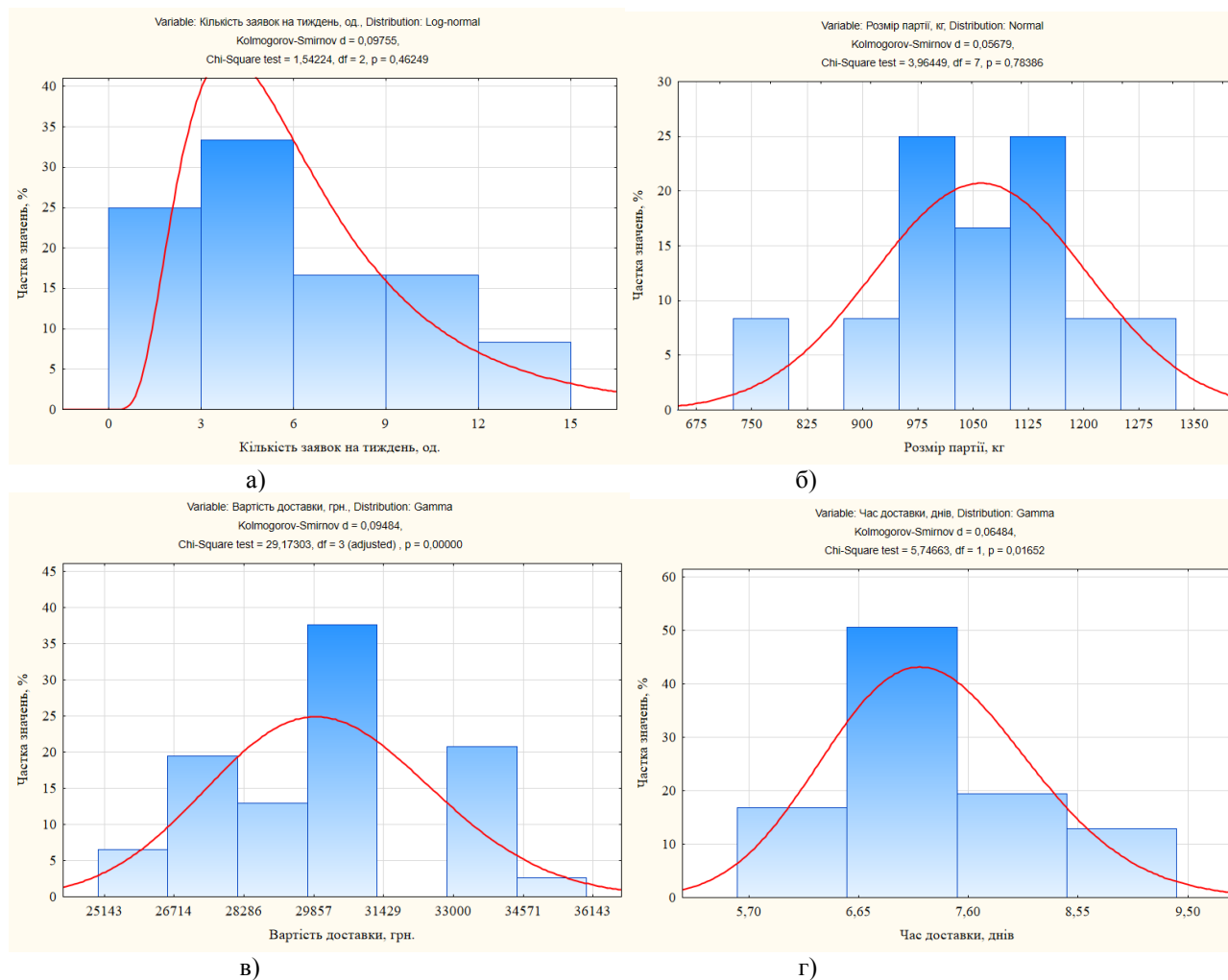


Рисунок 1 – Теоретичні криві та гістограми розподілу досліджуваних параметрів: а) логнормальний розподіл для кількості заявок на перевезення; б) нормальний розподіл для розміру партії; в) гама розподіл для вартості доставки; г) гама розподіл для часу доставки

Виявлення характеру розподілу змінних дозволяє виділити параметрів, що впливають на ефективність перевезень. Так, кількість заявок розподілена за логнормальним розподілом характеризується більшою мінливістю, а це вимагає підвищеної уваги до планування ресурсів. Мінливість може бути пов'язана з попитом, сезонністю або поведінкою замовників. Для ефективного управління процесами необхідно враховувати можливі коливання кількості заявок, щоб забезпечити відповідну кількість транспортних засобів та персоналу.

Нормальний розподіл для обсягу вантажу свідчить про його стабільність, що дозволяє планувати транспортування з відносно постійними обсягами.

Гама-розподіл часу доставки показує наявність тенденції до поступового збільшення цього показника, особливо за умови збільшення обсягів вантажу.

Також, знання законів розподілу дозволяє робити прогнозування та оцінювати ймовірності. Наприклад, ймовірність того, що кількість заявок перевищить середнє значення. Або здійснювати моделювання процесів на основі законів розподілу, наприклад, створення прогнозів для майбутніх періодів або планування ресурсів, а також проводити оцінку ризиків. Наприклад, ризик затримки доставки або ймовірність перевищення вартості доставки.

ВИСНОВКИ

Знання законів розподілу логістичних показників формує аналітичну базу для вдосконалення стратегій управління перевезеннями. Це, зокрема, сприяє більш точному плануванню ресурсів, прогнозуванню попиту, оптимізації графіків доставки та зниженню ризиків затримок і перевитрат. Інтеграція отриманих таким чином статистичних моделей у сучасні інформаційні системи управління дозволить логістичним підприємствам ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення та підвищувати ефективність операційної діяльності.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Chen W., Men Y., Fuster N. Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria. *Sustainability*. 2024.– № 16, art. no. 9145
2. Annosi M.C., Brunetta F., Bimbo F., Kostoula M. Digitalization within food supply chains to prevent food waste. *Drivers, barriers and collaboration practices*. 2021.– № 93. 208–220.
3. Matantseva O.Y., Spirin I., Ulitskaya N., Kazantsev I. Logistic as a tool to achieve sustainable development goals. *In proceedings of the second conference on sustainable development: industrial future of territories*. Amsterdam. 2021. P. 196–201.
4. Chauhan C., Kaur P., Arrawatia R., Ractham P., Dhir A. Supply chain collaboration and sustainable development goals (SDGs). *Teamwork makes achieving SDGs dream work*. 2022. – № 147. P. 290–307.
5. Canhoto A.I., Clear F. Artificial intelligence and machine learning as business tools. *A framework for diagnosing value destruction potential*. *Horizons*. 2020. – № 63. P. 183 – 193.
6. Uber Freight. Uber Freight research shows ⅓ of empty miles can be eliminated – here's how [Електронний ресурс]. 2023. Режим доступу: <https://www.uberfreight.com/blog/uber-freight-research-shows-%E2%85%94-of-empty-miles-can-be-eliminated-heres-how/> – Назва з екрана
7. Peng H., Shen N., Liao H., Xue H., Wang Q. Uncertainty factors, methods, and solutions of closed-loop supply chain. *A review for current situation and future prospects*. 2020. – № 254. P. 120 – 132.
8. Jomthanachai S., Wong W.-P., Lim C.-P. A coherent data envelopment analysis to evaluate the efficiency of sustainable supply chains. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2022. – №70(1). C. 105–118. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3056374>.
9. Пономарьова Н.В., Наумов В.С., Бабич І.А. Модель оцінки ефективності доставки вантажів у міжнародному сполученні. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2009. – №38. С. 38–40.
10. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. – №1 (11). С. 4–10.
11. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року : сайт URL: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 10.11.24.).
12. Дмитрів Д., Дмитрів О., Гавриляк Я. Підвищення економічної ефективності міжнародних вантажних автомобільних перевезень (на прикладі підприємств Тернопільської області). *Соціально-економічні проблеми і держава*. 2021. – № 2. С. 184–192.
13. Lagorio A., Gonzalez-Feli J., Pinto R. Urban freight demand estimation: a probability distribution based method. 7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain. July 8-11, 2018. Lyon, France, 2018. 8 p.
14. Ricard L., Desaulniers G., Lodi A. Predicting the probability distribution of bus travel time to measure the reliability of public transport services : *Transportation Research Part C: Emerging*. 2022.– Volume 138, 16 p. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103619>
15. Siripirote T., Sumalee A., Ho H. W. Statistical estimation of freight activity analytics from Global Positioning System data of trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2020. – Volume140, 13 p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2020.101986>

REFERENCES

1. Chen, W., Men, Y., Fuster, N. (2024). Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria. *Sustainability*, 16, art. no. 9145
2. Annosi, M.C., Brunetta, F., Bimbo, F., Kostoula, M. (2021). Digitalization within food supply chains to prevent food waste. *Drivers, barriers and collaboration practices*, № 93, 208–220.
3. Matantseva, O.Y., Spirin, I., Ulitskaya, N., Kazantsev, I. (2021). Logistic as a tool to achieve sustainable development goals. *In proceedings of the second conference on sustainable development: industrial future of territories*. Amsterdam, P. 196–201.
4. Chauhan, C., Kaur, P., Arrawatia, R., Ractham, P., Dhir, A. (2022). Supply chain collaboration and sustainable development goals (SDGs). *Teamwork makes achieving SDGs dream work*, № 147, P. 290–307.
5. Canhoto, A.I., Clear, F. (2020). Artificial intelligence and machine learning as business tools. *A*

framework for diagnosing value destruction potential. *Horizons*, № 63, P. 183 – 193.

6. Uber Freight. (2023, June 28). *Uber Freight research shows ⅓ of empty miles can be eliminated—Here's how*. Retrieved from <https://www.uberfreight.com/blog/uber-freight-research-shows-%E2%85%94-of-empty-miles-can-be-eliminated-heres-how/>

7. Peng, H., Shen, N., Liao, H., Xue, H., Wang, Q. (2020). Uncertainty factors, methods, and solutions of closed-loop supply chain. *A review for current situation and future prospects*, № 254, P. 120 – 132.

8. Jomthanachai, S., Wong, W.-P., & Lim, C.-P. (2022). A coherent data envelopment analysis to evaluate the efficiency of sustainable supply chains. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(1), 105–118. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3056374>

9. Ponomaryova, N. V., Naumov, V. S., & Babich, I. A. (2009). Model' otsinky efektyvnosti dostavky vantazhyv u mizhnarodnomu spoluchenni. *Skhidno-yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, 38, 38–40.

10. Aulin, V. V., Holub, D. V., Bilichenko, V. V., & Zamurenko, A. S. (2020). Formuvannya pokaznykiv otsinky efektyvnosti transportnoho protsesu perevezen. *Visnyk Mashynobuduvannya ta Transportu*, 1(11), 4–10.

11. Natsional'na transportna stratehiya Ukrainy na period do 2030. *Zakonsite*. Retrieved November 10, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua>

12. Dmytriv, D., Dmytriv, O., & Havrylyak, Y. (2021). Increasing the economic efficiency of international road freight transport (The case of enterprises in Ternopil region). *Social and Economic Problems and the State*, 2021(2), 184–192.

13. Lagorio, A., Gonzalez-Feli, J., & Pinto, R. (2018). Urban freight demand estimation: A probability distribution-based method. In *Proceedings of the 7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain* (pp. 1–8). Lyon, France: July 8–11, 2018

14. Ricard, L., Desaulniers, G., & Lodi, A. (2022). Predicting the probability distribution of bus travel time to measure the reliability of public transport services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 138, art. no. 103619. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103619>

15. Siripirote, T., Sumalee, A., & Ho, H. W. (2020). Statistical estimation of freight activity analytics from Global Positioning System data of trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, art. no. 101986. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2020.101986>

O. Svichynska. The Formation of the International Transportation Management Strategy Based on the Regularities of the Distribution of Logistics Indicators.

The article investigates the impact of statistical distribution patterns of key logistical parameters on the development of strategic management in international freight transportation. The relevance of this study is underscored by the increasing need for logistics companies to adapt to rapidly evolving global market conditions, particularly through the adoption of efficient, sustainable, and technology-oriented logistics solutions.

The paper addresses current challenges facing international logistics, such as fluctuating demand, environmental regulations, driver shortages, and infrastructure constraints. Special emphasis is placed on the role of logistics providers in enhancing the efficiency of international freight transportation. The study underscores the importance of integrating digital technologies, forecasting systems, data analytics, and artificial intelligence into logistics processes. It proposes a structured framework for analyzing the influence of critical factors – including transportation demand, shipment volumes, delivery costs, times, and distances – on logistics performance.

Using empirical data from a Ukrainian logistics company operating along the «Warsaw – Kyiv» and «Tomashiv – Kyiv» routes, the study conducts statistical analysis employing the Kolmogorov-Smirnov and Pearson chi-square tests. The probability distribution models for each parameter were identified and statistically validated. These findings provide a foundation for developing predictive models, improving resource allocation, and optimizing logistics operations. The proposed approach contributes to enhancing the competitiveness of logistics enterprises and supports the implementation of sustainable development strategies.

Keywords: international freight transportation, logistics strategy, distribution of logistical parameters, statistical analysis, digital technologies, transportation optimization, artificial intelligence

СВІЧИНСЬКА Ольга Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: svichinskayaolga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3424-3401>

SVICHYNSKA Olha Volodymyrivna, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: svichinskayaolga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3424-3401>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1746

Сивулька П.М., Сукач О.М.

*Львівський національний університет природокористування, Дубляни, Україна***ОЦІНКА ПЛОЩІ ПЛЯМИ КОНТАКТУ ШИНИ НА ГРУНТОВИХ ПОВЕРХНЯХ**

У статті проведено порівняльний аналіз відомих методик розрахунку плями контакту пневматичної шини колісних машин та опрацьовано пропозиції щодо умов взаємодії з опорними поверхнями, що деформуються. Класична оцінка-розрахунок площі плями контакту шини з опорною поверхнею базується на твердій бетонній поверхні – автодороги 1 категорії. Однак у аграрній та військовій сферах домінують ґрунтові поверхні, що змінює площу контакту. Проведено порівняльний аналіз відомих 3-х основних методик розрахунку площі плями контакту – вітчизняної (введеної в дію 1972 року) для автомобілів загального призначення, західноєвропейської у аграрній сфері та WES – методики військ НАТО.

Для врахування зміни площі плями контакту шини на поверхнях, що деформуються з значним розмаїттям типів і фізико-механічних характеристик, запропоновано використання стандартного у WES – методики показника твердості ґрунту як опорної поверхні колеса – конусного індексу CI (cone index), що використовується для оперативної оцінки прохідності та мобільності руху автотехніки бездоріжжям. Окрім навантаження на колесо значну роль на формування площі контакту відіграє зміна тиску повітря в шині, що теж враховано на основі узагальнених даних щодо відповідної зміни радіальної деформації шини.

Уточнення зміни площі плями контакту шини для конкретних типів і станів ґрунтів дозволяє провести більш коректну агроекологічну оцінку колісних тракторів та автомобілів у конкретних умовах руху.

Ключові слова: ущільнення ґрунтів, автомобіль, трактор, колесо, пляма контакту, тиск, твердість ґрунту.

ВСТУП

Зростаюче розповсюдження важких колісних тракторів класів тяги 3...6 (починаючи з 1980-х років Т 150К, К 700, а на сьогодні практично всіх європейських виробників) у аграрній сфері та великотоннажних автомобілів зумовили актуальність проблеми надмірного ущільнення сільськогосподарських угідь, що спричинює деградацію земель та відповідне зниження урожайності [1, 2 та ін.]. Існуюча вітчизняна нормативна база [3-5] регламентує з умов агроекології граничні допустимі значення питомого навантаження у контакті шин з ґрунтом залежно від пори року, типу ґрунту та вмісту вологи. Однак оцінка – розрахунок тиску колеса на ґрунт вимагає визначення площі плями контакту з опорною поверхнею. Остання ж класично визначається щодо твердої, бетонної опорної поверхні, що не є адекватним для ситуації з деформацією ґрунту/піску, враховуючи різний вміст у ньому вологи.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Тиск у контакті шини з опорною поверхнею переважно оцінюють у підручниках і досі як збільшене у 1,2-1,25 рази значення тиску повітря у шині [6 і ін.]. Однак очевидно, що для спорядженої чи повної маси автомобіля з можливою двократною зміною навантаження на вісь/колесо тиск у контакті змінюється. Зрештою і зниження тиску повітря в шині на 50% не спричиняє аналогічне падіння тиску у контакті [2 і ін.]. Нормативна база [5] не регламентує методику розрахунку площі контакту шини з опорною поверхнею і базується на експериментальному замірі площі відбитка плями контакту на жорсткій основі згідно ДСТУ ГОСТ 7057 з наступним збільшенням у 1,6-1,1 рази, залежно від зовнішнього діаметра колеса (відповідно до ДСТУ 4140). Отримане значення середнього статичного тиску колеса на ґрунт збільшують у 1,5 рази (коефіцієнт поздовжньої нерівномірності розподілення статичного тиску за площею контакту шини, але з приміткою необхідності уточнення з виробниками нових високоеластичних шин, що відсутнє). Питомий тиск у контакті шини з ґрунтом, що деформується, є одним з визначальних чинників як прохідності автомобіля бездоріжжям, так і ущільнення ґрунту з умов агроекології тракторами і автомобілями на сільськогосподарських угіддях. Очевидно, що формування питомого тиску у контакті з опорною поверхнею при конструктивно відомому навантаженні на колесо, визначається площею плями контакту, розрахунок якої у відомих дослідженнях базується на розрахунку контакту конкретної шини з бетонною поверхнею під дією заданого вертикального навантаження від автомобіля.

Зокрема у вітчизняних дослідженнях [6] площа плями контакту шини з опорною (твердою) поверхнею визначається комплексом з 7 формул, що у свою чергу є розвитком простіших залежностей визначення радіальної деформації шини насамперед під впливом вертикального навантаження на колесо на твердій опорній поверхні:

$$F_k = \frac{\pi}{4} a_k b_k \quad (1)$$

де: a_k - велика піввісь еліпса (довжина плями контакту), b_k - мала піввісь (ширина плями контакту). У свою чергу (за статистичними даними типорозмірів шин) останні можуть бути визначені як:

$$a_k = c_3 \sqrt{D - f_t^2} \quad b_k = 2 \sqrt{2 R_{pr} f_t - f_t^2} \quad (2)$$

де: D - статичний діаметр колеса (без навантаження), f_t - прогин шини під дією радіального навантаження на колесо, внутрішнього тиску повітря в шині та ще 3-х постійних для даної шини коефіцієнтів [6], R_{pr} - приведений радіус поперечного перерізу шини, $R_{pr} = \frac{B+H}{2,5}$ (B - ширина шини, H - висота профілю шини); c_3 - коефіцієнт, що залежить від розміру шини та норми шаруватості, ще додатково 4 емпіричні формули [6].

У вітчизняних дослідженнях початково використовувалась більш проста залежність [7, 8]:

$$F_k = \mu_k \sqrt{B D p_k} \quad (3)$$

де: h_k - глибина колії, утвореної колесом у ґрунті:

$$h_k = G_k / \pi R \sqrt{D} \quad (4)$$

де: G_k - навантаження на колесо, p_k - тиск повітря в шині.

Практично ця ж ситуація характерна і для досліджень та методик, які застосовуються пострадянськими країнами у сфері агроєкології колісної техніки, за винятком нещодавніх публікацій, де на підставі критики існуючої нормативної бази агроєкологічної оцінки – ГОСТ 26953-86, ГОСТ 26953-86 та ГОСТ 26954-86 (що покладені в основу і чинних ДСТУ [3-5]) щодо статичної процедури оцінки нерухомих машин, без врахування перерозподілу навантажень на осі під час руху з навісним чи причіпним устаткуванням, запропоновано доповнену, розширену залежність розрахунку тиску шин на ґрунт. Однак щодо визначення площі плями контакту змін не пропоновано, тобто методика передбачає статичну взаємодію колеса з опорною поверхнею.

В країнах ЄС розрахункове визначення площі плями контакту на ґрунті, що деформується, дещо відрізняється і в основу залежностей покладено два типи ґрунтів – середньої щільності та вологі, де співвідношення отриманої глибини колії z та діаметру колеса D є у межах $0,025 < z/D < 0,05$ та м'яких, розпушених ґрунтів з $z/D > 0,05$. Різні емпіричні залежності теж можна розділити на 2 групи – використання для розрахунку площі плями контакту а) характеристик шини (типорозміру), тиску повітря в шині та навантаження на колесо і б) радіусу колеса, глибини колії і радіальної деформації шини. З аналізу публікацій слід виділити (по групі а)) дисертаційну роботу Dr. - Ing. M Steiner [9], де розглянуто ґрунт середньої щільності та вологі (5-7), але розділено залежності для радіальних (9) та діагональних (8) шин на твердій площині (що актуально для сучасної практики в Україні й крім цього залежності (1)-(4) базуються на застосуванні діагональних шин):

- для повнопрофільних шин -  (5)

- для низькопрофільних шин  (6)

- для шин з всюдихідним протектором  (7)

Розрахунки для твердої поверхні:

- діагональні шини  (8)

- радіальні шини  (9)

У дисертаційній роботі Dr.-Ing. I. Bolling [10] розрахунок площі плями контакту ґрунтується на вищезазначеній групі параметрів б), запропоновано для обох типів ґрунтів у формі наступної емпіричної залежності:

$$F_k = [r_0^2 - (r_0 - H)^2]^{0.5} E \quad (10)$$

де r_0 - статичний (номінальний) радіус кочення колеса. Разом з тим слід зазначити, що у даній залежності (10) не враховується тиск повітря в шині (і його вплив на площу плями контакту), а вплив навантаження на колесо та опір деформації ґрунту (твердість) – побічно, через глибину колії, що вимагає окремого розрахунку.

Зростаючого розповсюдження, у т.ч. нормативних рекомендацій профільних міністерств ФРН, Австрії, Швейцарії і ін., набувають емпіричні залежності розрахунку площі плями контакту згідно робіт Dr. E. Diserens [11, 12 та ін.], де враховуються, окрім вищезгаданих навантаження на колесо і типорозміру шини, також й вплив зміни тиску повітря у шині:

$$F_k = \frac{E \cdot B \cdot H}{c} \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^a \quad (11)$$

де: a , b , c - емпіричні коефіцієнти оцінки взаємозв'язку площі та, відповідно, типорозміру шин, тиску повітря у шинах та навантаження на колесо. Проведені об'ємні польові випробування на суглинкових ґрунтах помірної зволоженості для 13 моделей шин 3-х типів – повно-і низькопрофільні (тут повнопрофільні – при співвідношенні висоти H до ширини профіля B шин від 0,7 до 1,0), а також так зв. ґрунтового типу (terrareifen) з співвідношенням $H/B < 0,6$, табл. 1. Окремо виділено так звану універсальну залежність – для всіх типів шин, у т.ч. невизначених, також і діагональних (в основі даного дослідження власне радіальні шини, за винятком шин типу terrareifen - діагональних). Експериментальна оцінка проводилась на 6 типах ґрунтів, суглинкових та супіщаних, з різним вмістом вологи, після вирощування цукрового буряка, пшениці та ріпаку, а також трав'янистого луку.

Таблиця 1 - Значення емпіричних коефіцієнтів впливу шин та навантаження щодо площі контакту за [11].

Тип шини	a	b	c
Повнопрофільні	0,260	- 205,944	0,566
Низькопрофільні	0,416	- 457,670	0,186
Ґрунтові	0,420	-1120,680	0,370
Інші, невизначені	0,428 - 650,215		0,221

Практично слід констатувати, що вищевикладена методика [11] очевидно є найбільш опрацьованою, однак щодо суглинкових ґрунтів у період весняно-польових робіт.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Очевидні відмінності у формуванні площі плями контакту шини автомобіля/трактора з твердою бетонною поверхнею та ґрунтовою поверхнею, що деформується, обумовлюють огляд та аналіз відомих вітчизняних та зарубіжних досліджень у цій сфері. Розвиток інструментарію оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту та реалії використання колісної техніки створюють передумови для оперативної оцінки питомого тиску на ґрунт, тобто і визначення площі плями контакту шин, з умов агроекології.

Відповідно сформовано першочергові задачі дослідження:

- порівняльний аналіз і оцінка існуючих вітчизняних і зарубіжних досліджень щодо розрахункового визначення площі плями контакту шини з опорною поверхнею;
- аналіз формування колії і плями контакту шини на ґрунтових поверхнях, що деформуються;

- опрацювання напряму досліджень, що дозволяють враховувати фізико-механічні характеристики типів і станів ґрунтової поверхні, що впливають на формування плями контакту шини.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Враховуючи вітчизняні реалії парку сільськогосподарських машин та військової колісної автотехніки актуальним є насамперед оцінка відмінностей формування плями контакту діагональних та радіальних шин, різниця між якими є очевидною – табл. 1. Згідно даних західноєвропейських досліджень [12 і ін.] ця різниця (при тотожних типорозмірах шин та навантаженнях) є відчутною, (рис. 1), але розповсюдження радіальних на військових машинах та бездоріжжя стримує підвищена чутливість боковин до механічних пошкоджень. При формуванні колії боковина шини входить у безпосередній контакт – деформації ґрунту на глибину колії, що фактично формує тривимірну пляму контакту шини з опорною поверхнею, з передачею певного часткового тиску і на боковини (на відміну від звичної двовимірної плями контакту на твердих поверхнях, що не деформуються).

Вплив жорсткості боковин шин (різної у радіальних та діагональних шин ідентичного типорозміру) загальновідома і по зміні форми поперечного перерізу плями контакту при великому зниженні тиску повітря в шині і виділенню найнижчих ліній деформації ґрунту по боковинах, на відміну від центральної при номінальному тиску в шині.

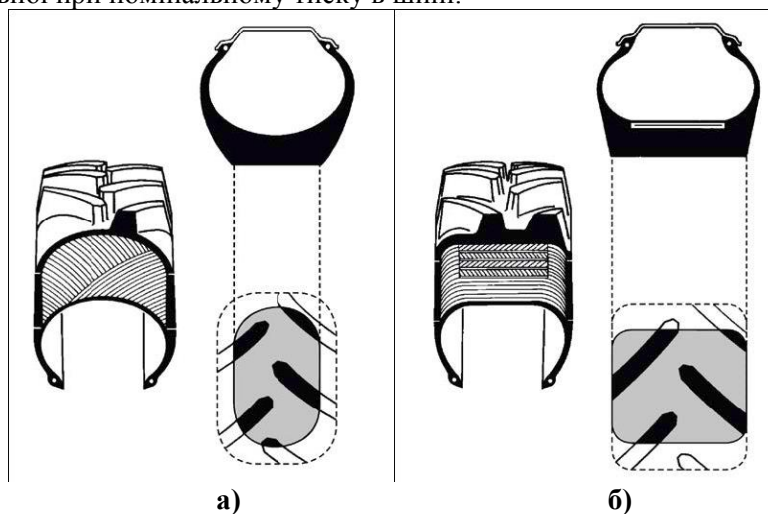


Рисунок 1 - Формування плями контакту на м'якому ґрунті діагональної (а) та радіальної (б) шин [17]

У класичній теорії автомобіля [6, 10 і ін.] рух шини деформованою поверхнею з утворенням колії окрім звичного зчеплення і опору коченню шини внаслідок її деформації і гістерезисних втрат у самій шині $f_{ш}$ та деформації опорної поверхні з колією певної глибини f_e додатково враховується (рис. 2.):

- опір зміщенню ґрунту (піску) від зсуву вперед (т. зв. бульдозерний ефект) f_b ;
- опір (додаткова затрата енергії) внаслідок пробуксовування ведучого колеса і додаткового заглиблення в опорну поверхню та переміщення частини ґрунту (піску) із зони контакту у напрямку обертання колеса (т. зв. екскаційний ефект) f_e ;
- опір горизонтальному зміщенню верхньої частини опорної поверхні, еквівалентної поперечній площині колії, що утворюється внаслідок руху колеса (т. зв. тиск відпаду) f_v ;
- для зв'язних опорних поверхонь також додатковий опір коченню колеса внаслідок прилипання частинок ґрунту до шини f_n .

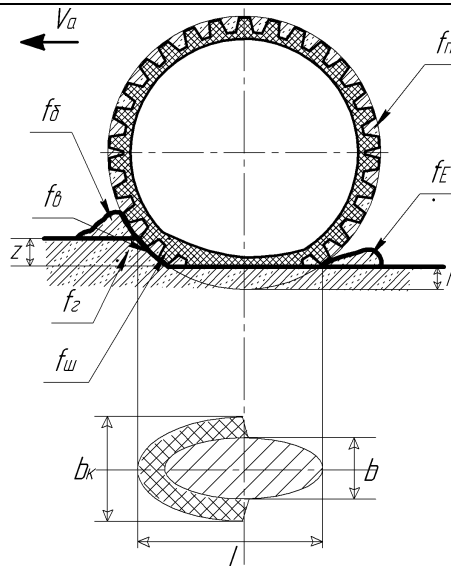


Рисунок 2 - Розрахункова схема взаємодії колеса з ґрунтом та формування плями контакту [6, 10]

Очевидно, що принаймні у більшості цих ефектів є контакт шини з ґрунтом, зокрема і боковин, що видозмінює площу контакту у порівнянні з фактично плоскою на твердій опорній поверхні – лінія b_k бічного розширення колії (рис. 2), що особливо характерно для діагональних шин, розповсюджених на техніці для бездоріжжя (контурна лінія плями контакту, рис.1). Зрештою бічну деформацію – ущільнення ґрунту засвідчують і польові дослідження – розподіл ізоліній деформацій вбік стінок колії (рис. 3) [13] та корегувальні коефіцієнти збільшення площі плями контакту на твердій поверхні при розповсюджених спрощених визначеннях питомого тиску на ґрунт [5-10].



Рисунок 3 - Зміщення ліній деформації ґрунту навколо колії від колеса [18]

Практично слід констатувати тривимірний, об'ємний характер контакту шини у колії, звично з різним розподілом питомого тиску на ґрунт по боковинах і основі плями, але і не коректністю зведення навантаження на колесо тільки до горизонтальної площадки – основи плями. Оцінка площі об'ємного контакту, однак, є проблемною і фактично не досліджуваною. Спроба використання для заміру площі контакту цифрової фотокамери з програмним забезпеченням Software Adobe Photoshop, що дозволяє розрахувати площу у метричній системі (12), теж обмежена фактично двомірним зображенням і знову ж таки побудована на експерименті [14]:

$$KF = \left[\frac{H_{px} * B_{cm}}{B_{px}} \right] * N_{pixpolygon} \quad (12)$$

де: KF - площа контакту, см^2 , H_{pix} - довжина, піксель; B_{pix} - ширина, піксель; B_{cm} - ширина, см ; H_{pixkam} - піксель камери, $H_{pixpolygon}$ - кількість піксель полігон.

Важливим аспектом розрахункового визначення площі плями контакту є також врахування характеристик ґрунту. Оперативна оцінка стану ґрунту (і відповідно пов'язаних з цим емпіричних залежностей розрахунку показників руху колісних і гусеничних машин) краще опрацьована у дослідженнях з військовою технікою, так зв. WES – методикою армії США, що бере свій початок ще з 2-ї світової війни та покладена в основу нормативної бази армій НАТО і інших країн [15, 16 і ін.]. В основу оцінки ґрунту/піску як опорної поверхні покладено комбінований показник твердості – так зв. конусний індекс CI (cone index), що поєднує оцінку вертикальної деформації та зсуву вбік, характерних для взаємодії колеса з ґрунтовою поверхнею, що деформується. Оперативна оцінка стану ґрунту базується на використанні стандартизованого пенетрометра з відповідним конусним наконечником [17]. Звично, що твердість ґрунту і його щільність, що фігурує у нормативній базі [3-5], є різними параметрами, однак твердість, на відміну від щільності, можна визначити миттєво і використовувати для оцінки технологій механічного обробітку землі (згідно дослідження акад. Медведєва В.В. [18]) і вже використовується в агроекологічній оцінці сільськогосподарських угідь [19 і ін.]. Окрім цього з механіки ґрунтів очевидний взаємозв'язок обидвох параметрів, що для кожного з типів ґрунтів може бути визначений у формі певної кореляційної залежності [20] та дозволяє побічно і оцінити вологість ґрунту (від якої залежить і твердість).

У військовій WES-методиці відсутня методика прямого розрахунку – визначення площі плями контакту на ґрунтових/піщаних поверхнях, чітко визначена процедура статичної її оцінки на бетонній поверхні, що фігурує надалі у поєднанні з показником твердості – конусним індексом CI у опрацьованих емпіричних залежностях розрахунку динаміки і енергетики руху, що є актуальним і для аграрної та інших сфер використання самохідної техніки. Слід також зауважити, що значення CI прив'язане до чітко регламентованої форми конусного наконечника пенетрометра і темпу його вдавлювання в ґрунт [16, 17], на відміну від різних форм наконечників пенетрометрів, уже наявних і в аграрній сфері [19]. Всі параметри типорозміру шини та навантаження і, відповідний радіальний прогин – деформація (при заданому тиску повітря в шині), що і формують площу плями контакту шини з твердою поверхнею у суміщенні з значенням CI (твердості ґрунту) фігурують у WES – методиці з визначення так зв. індексу мобільності машин MN (mobility number/index), однак безпосередньо розрахункове визначення площі плями контакту на конкретному бездоріжжі не опрацьовувалось. Разом з тим методологія WES створює передумови для опрацювання даного питання з врахуванням фактичного стану ґрунту, а саме його твердості.

Окремого, детальнішого дослідження потребує і оцінка площі плями контакту здвоєних шин, що власне з умов агроекології часто використовуються як засіб зменшення ущільнення ґрунту [21 і ін.]. Крім цього, на формування плями контакту здвоєних шин впливає міжколісна відстань (утворення міжколісних буртів колій), однак площа плями контакту не збільшується лінійно вдвічі – додаткова маса другого колеса та зменшення вдвічі навантаження на кожне з коліс поряд з, як правило, зміною тиску повітря у здвоєних шинах обумовлюють необхідність окремого дослідження формування [21, 22].

Зміна тиску повітря в шинах теж не має лінійного впливу на формування площі плями контакту, зрештою як і на розподіл тиску у зоні контакту колеса з ґрунтом [23], що ще донедавна (і досі у багатьох підручниках) визначався як збільшений у 1,3-1,5 тиск повітря у шинах. Зміна плями контакту залежно від тиску повітря в шинах має нелінійний характер і пов'язана, окрім навантаження на колесо і типорозміру шин, також і з твердістю опорної поверхні – ґрунту.

Найбільш опрацьованою методикою оцінки питомого тиску у контакті шини з ґрунтом з умов агроекології (а відповідно і розрахунку площі плями контакту), як показує проведений огляд та аналіз публікацій, є швейцарсько-данська комп'ютеризована програма розрахунку Terranimo [24], що базується і на вищезгаданому дослідженні Е. Diserens [11] та враховує і твердість ґрунту (з прив'язкою щодо питомого вмісту глини і води). Допустимість/шкідливість конкретного значення

тиску у контакті оцінюється двопараметровою діаграмою „твердість ґрунту – питомий тиск у контакті”. Однак програма опрацьована фактично для типових для Данії суглинків з вмістом глини 5-18% та діапазону вологості, характерного для даної кліматичної зони.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проведений огляд вітчизняних і західноєвропейських методик розрахунку площі плями контакту дозволяє констатувати практичну відсутність методики розрахунку на поверхнях, що деформуються, з врахуванням конкретного стану і типу ґрунтів. Основою такої методики доцільно формувати на базі WES – методики, де на відміну від досліджень у аграрній сфері, найбільш детально опрацьована оперативна оцінка фізико-механічних характеристик ґрунту – твердості (конусного індексу CI), на базі якої сформовано емпіричні залежності динаміки та енергетики руху, а також деформації ґрунту – глибина колії, тобто і значення тиску у зоні контакті шини з дорогою, що формується у т.ч. також площею плями контакту. Очевидність збільшення площі плями контакту відповідно до зменшення твердості ґрунту (у порівнянні з бетонною поверхнею, що домінує в існуючих методиках і нормативних актах) обумовлює доцільність проведення окремого експериментального дослідження, принаймні для 4-5 основних типів орних земель України з різним вмістом вологи і значень твердості, що дозволило б отримати відповідні кореляційні залежності приросту площі контакту відповідно зменшенню твердості ґрунту.

ВИСНОВКИ

1. Існуючі загальноприйняті методики розрахунку площі плями контакту шини автомобіля з опорною поверхнею базуються, як у вітчизняних так і зарубіжних дослідженнях, на деформації шини під заданим навантаженням на бетонній поверхні. Зміна площі плями контакту на грантових поверхнях, що деформуються, залежить від типу і стану ґрунту, насамперед вмісту вологи. Очевидно, що і величина тиску у контакті шини з даним конкретним станом ґрунту зменшується у порівнянні з розрахунковою щодо твердої поверхні пропорційно збільшенню площі плями контакту, що набуває об'ємної форми з виразно нерівномірним розподілом навантаження.

2. Для розрахунку близького до реального навантаження (питомого тиску) у контакті шини з ґрунтом, що деформується, для визначення площі контакту повинно враховувати твердість ґрунту, найбільш опрацьованим комплексним показником якої (з врахуванням опору зсуву, характерного для взаємодії шини з опорною поверхнею) є так зв. конусний індекс CI (cone index), стандартизований у методології армій НАТО (WES – методика армії США щодо оцінки прохідності та мобільності руху). Останній, окрім опрацьованих емпіричних залежностей динаміки руху автомобіля/трактора, дозволяє здійснити і непряму оцінку вмісту вологи у ґрунті. Звично, що це вимагає додаткових цільових досліджень кореляції твердості і вологості для основних типів ґрунтів, однак дозволяє уникнути складної процедури оцінки вмісту вологи в ґрунті.

3. З аналізу існуючих методик розрахунку площі плями контакту шин з твердою опорною поверхнею, беручи до уваги, що емпірика вітчизняної методики базується на діагональних шинах, контур контакту яких дещо відрізняється від зараз домінуючих радіальних шин (рис. 1), можна рекомендувати методику Е. Diserens (11), що є домінуючою у дослідженнях (і нормативних рекомендаціях) в країнах ЄС.

4. Беручи до уваги сучасний розвиток вимірювальної техніки і реалії її розповсюдження в аграрній та військовій сферах України є необхідність прийняття в Україні як ДСТУ – ISO 22476 [22]. Окрім цього експериментальні дослідження та розвиток, внесення змін в існуючу нормативну базу [3 - 5] з деталізацією процедури визначення площі плями контакту шини на різних, базових типах ґрунтів з оперативною оцінкою твердості – конусного індексу CI та відповідними даними щодо гранично допустимих значень тиску у контакті шини з ґрунтом з умов агроекології.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Медведєв В.В. Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-тракторних агрегатів. *Вісник аграрної науки*. Київ, 2012. № 10. С. 39-45.
2. Ребров О.Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях»*. Харків, 2018. № 27. С. 110–116.
3. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. [Чинний від 2007-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 8с.

4. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2008. 10с.
5. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. [Чинний від 2006-06-01]. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України. 2005. 10 с.
6. Кальченко Б.І., Ребров О.Ю., Кожушко А.П., Мамонтов А.Г., Якунін М.Є. Динаміка руху колісних тракторів: монографія. Харків: Вид. В.А. Мірошніченко, 2021. 320 с.
7. Надикто В.Т. Проблеми баластування колісних тракторів. *Техніка і технології в АПК*, № 2, 2013. С. 7–9.
8. Болдовський В.М. Оцінка впливу рушіїв колісних тягово-транспортних засобів на ґрунт / Дис. канд. техн. наук: спец. – 05.22.02 "Автомобілі та трактори" – Харків, ХНАДУ, 2011–171 с.
9. Steiner M. Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik. 33. 1979. Dissertation, Muenchen. 178 s.
10. Bolling I. Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. 133. 1987. Dissertation, Muenchen. 174 s.
11. Diserens E. Ermittlung der Reifen-Kontaktflaechen im Feld mittels Rechenmodell. *FAT Berichte*, Schweiz. 2002. Nr. 613. S. 1–16.
12. Brunotte J., Brandhuber R., Vorderbruegge T., Schrader S. Gute fachliches Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. *Bundesanstalt fuer Landwirtschaft und Ernaehrung*, Berlin. 2018. 62 s.
13. Moitzi G. Bodenverdichtung im Pflanzenbau. Biogas Spezialberaterfortbildung. Unversitaet fuer Bodenkultur Wien. 2010. 46 s.
14. Schwieger H. Untersuchung neuartiger Laufwerke und lasergestuezte Erfassung der Reifen-/Bodenfermormung / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. Dissertation, Kiel. 181, 1996. 162 s.
15. Wong Y.J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. Butterworth. London. 2010. 482 p.
16. Грубель М.Г., Крайник Л.В. Прохідність військових автомобілів: монографія. Київ: Професіонал, 2023. 182 с.
17. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. First edition. 2012-09-15.
18. Медведєв В.В. Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку. *Вісник аграрної науки*, № 4, 2010. С. 14–18.
19. Іванишин В.В., Рудь А.В., Мошенко І.О. Визначення переущільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. Подільський ДАТУ, 2017. Вип. 27. С. 146–158.
20. Медведєв В.В., Лындина Т.Е., Лактионова Т.Н. Плотность сложения почв. Харків: 13 типографія, 2004. 243с.
21. Ребров О.Ю. Аналіз ефективності здвоювання тракторних шин. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського*. Серія: технічні науки. Том 30 (69), ч.2, № 5, 2019. С. 18–22.
22. Галич І.В., Антощенков Р.В., Антощенков В.М., Дюндик С.М., Жарко Ю.Г. Динаміка одинарних та здвоєних колісних систем трактора у вертикальному напрямку. *Інженерія природокористування*, 2020, №4(18), с. 14–23
23. Hoeltkemeyer V. Messen der Reifenverformung bei verschiedenen Radlasten und Luftdruecken / *Landtechnik*, No 2 (60), 2005. S. 76–77.
24. Diserens E., Spiess E. TASC-eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. *Agrarforschung* 12 (1), 2005, S. 22–29.

REFERENCES

1. Medvediev, V.V. (2012). Ekolohizatsiia v konstruiuvanni ta ekspluatatsii zemlerobskykh mashynno-traktornykh ahrehativ. *Visnyk ahrarnoi nauky*. Kyiv, № 10. 39–45.
2. Rebrov, O.Iu. (2018). Rozpodil dopustymoho tysku na grunt khodovykh system kolisnykh traktoriv za terytoriiu Ukrainy. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriiia «Matematychnye modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh». Kharkiv, № 27. 110-116.

3. DSTU 4521:2006. (2007-07-01). Tekhnika silskohospodarska mobilna. Normy dii khodovykh system na grunt.. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 8s.
4. DSTU 4977:2008. (2009-01-01). Tekhnika silskohospodarska mobilna. Metody vyznachennia maksimalnoho napruzhenia v grunti pid diieiu khodovykh system.. Vyd. ofits. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 10s.
5. DSTU 4977:2008. (2009-01-01). Tekhnika silskohospodarska mobilna. Metody vyznachennia maksimalnoho napruzhenia v grunti pid diieiu khodovykh system.. Vyd. ofits. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 10s.
6. Kalchenko, B.I., Rebrov, O.Iu., Kozhushko, A.P., Mamontov, A.H. & Yakunin M.Ie. (2021). Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv: monohrafiia. Kharkiv: Vyd. V.A. Miroshnichenko, 320.
7. Nadykto, V.T. (2013). Problemy balastuvannia kolisnykh traktoriv. *Tekhnika i tekhnologii v APK*, № 2, 7–9.
8. Boldovskiy, V.M (2011). Otsinka vplyvu rushiiv kolisnykh tiahovo-transportnykh zasobiv na hrunt. Dys. kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.02 "Avtomobili ta traktory" Kharkiv, KhNADU, 171.
9. Steiner, M. (1979). Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik. 33. Dissertation, Muenchen. 178.
10. Bolling, I. (1987) Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. 133. 1987. Dissertation, Muenchen, 174.
11. Diserens, E. (2002). Ermittlung der Reifen-Kontaktflächen im Feld mittels Rechenmodell. FAT Berichte, Schweiz. Nr. 613. 1–16.
12. Brunotte, J., Brandhuber, R., Vorderbruegge, T. & Schrader, S. (2018). Gute fachliches Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bundesanstalt fuer Landwirtschaft und Ernaehrung, Berlin. 62 s.
13. Moitzi, G (2010). Bodenverdichtung im Pflanzenbau. Biogas Spezialberaterfortbildung. Unversitaet fuer Bodenkultur Wien, 46.
14. Schwieger, H. (1996). Untersuchung neuartiger Laufwerke und lasergestuezte Erfassung der Reifen-/Bodenfermormung / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. Dissertation, Kiel. 181, 162.
15. Wong, Y.J. (2010). Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. Butterworth. London, 482.
16. Hrubel, M.H. & Kraynyk, L.V. (2023). Prokhidnist viiskovykh avtomobiliv: monohrafiia. Kyiv: Profesional, 182.
17. ISO 22476-1:2012. (2012-09-15). Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. First edition.
18. Medvediev, V.V. (2010). Tverdist gruntu yak kryterii dlia obgruntuvannia tekhnologii tekhnichnykh zasobiv z yoho obrobitku. *Visnyk ahrarnoi nauky*, № 4, 14–18.
19. Ivanyshyn, V.V., Rud, A.V. & Moshenko, I.O. (2017). Vyznachennia pereushchilnennia gruntiv u hospodarstvakh zakhidnoi chastyny lisostepu Ukrainy. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika*. Podilskyi DATU. Vyp. 27, 146–158.
20. Medvedev, V.V., Lyindina, T.E. & Laktionova, T.N. (2004). Plotnost slozheniya pochv. Harkiv:13 tipografiya, 243.
21. Rebrov, O.Iu. (2019). Analiz efektyvnosti zdvoiuivannia traktornykh shyn. *Vcheni zapysky TNU im. V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky*. Tom 30 (69), ch.2, № 5, 18–22.
22. Halych, I.V., Antoshchenkov, R.V., Antoshchenkov, V.M., Diundyk, S.M. & Zharko, Yu.H. (2020). Dynamika odyarnykh ta zdvoienykh kolisnykh system traktora u vertykalnomu napriamku. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, №4(18), 14–23.
23. Hoeltkemeyer, V. (2005). Messen der Reifenverformung bei verschiedenen Radlasten und Luftdruecken / Landtechnik, No 2 (60), 76–77.
24. Diserens, E., Spiess, E. (2005): TASC-eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. *Agrarforschung* 12 (1), 2005, 22–29.

Syvulka P.M., Sukach O.M. Assessment of tire contact spot area on soil surfaces

The article presents a comparative analysis of known methods for calculating the contact patch of a pneumatic tire of wheeled vehicles and develops proposals for the conditions of interaction with deformable support surfaces. The classical assessment-calculation of the area of the contact patch of a tire with a support

surface is based on a hard concrete surface - a 1 class road. However, in the agricultural and military sectors, soil surfaces dominate, which changes the contact area. A comparative analysis of the known 3 main methods for calculating the area of the contact patch is carried out - national (introduced in 1972) for general-purpose vehicles, European in the agricultural sector and WES - the method of NATO troops.

To take into account the change in the area of the tire contact patch on surfaces that deform with a significant variety of types and physical and mechanical characteristics, it is proposed to use the standard in the WES method - the indicator of soil hardness as a wheel support surface - the cone index CI (cone index), which is used for operational assessment of the patency and mobility of off-road vehicles. In addition to the load on the wheel, a significant role in the formation of the contact patch is played by the change in air pressure in the tire, which is also taken into account on the basis of generalized data on the corresponding change in the radial deformation of the tire.

Clarification of the change in the area of the tire contact patch for specific types and conditions of soils allows for a more correct agroecological assessment of wheeled tractors and vehicles in specific driving conditions.

Keywords: soil compaction, car, tractor, wheel, contact patch, specific pressure, soil hardness.

СИВУЛЬКА Петро Михайлович, аспірант, Львівський національний університет природокористування, e-mail: petr1111@i.ua.

СУКАЧ Олег Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Автомобілів і тракторів», Львівський національний університет природокористування, e-mail: 19oleg85@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0867-335X>.

Petro SYVULKA, PhD student, Lviv national environmental university, e-mail: petr1111@i.ua.

Oleh SUKACH, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of automobiles and tractors, Lviv national environmental university, e-mail: 19oleg85@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0867-335X>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1747

Стефанов В.О., Держинський І.В.
Український державний університет залізничного транспорту

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ БАШТОВОГО КРАНА ЗА ДОПОМОГОЮ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

У роботі розглядається процес оптимізації функціонування баштового крана через впровадження автоматизованих систем управління. Проаналізовано основні переваги автоматизації, серед яких підвищення ефективності роботи крана, зниження ризиків людських помилок та зменшення витрат на обслуговування. Особливу увагу приділено сучасним технологіям, що дозволяють здійснювати точне управління процесами підйому та переміщення вантажів, а також інтеграції систем моніторингу і діагностики стану обладнання. Впровадження таких систем дозволяє значно покращити продуктивність роботи, забезпечити безпеку та знизити вплив людського фактора на роботу баштового крана.

У роботі розглянуто вплив людського фактора на працездатність баштових кранів та можливість його зменшення через впровадження систем машинного зору. Проаналізовано ризики, пов'язані з людськими помилками, та їхній вплив на безпеку й продуктивність робіт. Окреслено принципи роботи систем машинного зору, їхні технічні можливості та переваги в автоматизації керування краном, зокрема для моніторингу робочої зони, визначення траєкторій руху вантажів і мінімізації ризику зіткнень. Розглянуто методи реалізації цих систем за допомогою камер, сенсорів та алгоритмів глибокого навчання. Досліджено ефективність алгоритмів, таких як згорткові нейронні мережі (CNN), і технічні виклики, що виникають при інтеграції цих технологій. Результати показали, що системи машинного зору підвищують безпеку, знижують навантаження на оператора та покращують ефективність експлуатації кранів.

Впровадження систем машинного зору є важливим кроком до покращення безпеки, підвищення ефективності та зниження навантаження на операторів при експлуатації баштових кранів. Крім того, такі системи можуть визначати безпечні траєкторії для переміщення вантажів, мінімізуючи можливість зіткнень або пошкоджень.

Ключові слова: баштовий кран, аварії, людський фактор, моніторинг, машинне бачення, сонливість, штучний інтелект, система безпеки.

ВСТУП

Баштові крани є життєво важливим обладнанням на будівельних майданчиках, відіграючи ключову роль у підйомі та переміщенні матеріалів і будівельних компонентів [1]. Ефективність та безпека роботи цих кранів значною мірою залежить від досвіду та навичок операторів, зокрема від їх здатності точно планувати траєкторію руху. Помилки в оцінці відстаней та обмежений огляд можуть призвести до серйозних аварій, таких як зіткнення вантажу з елементами будівлі або його падіння на робітників.

На жаль, подібні інциденти трапляються досить часто. Наприклад, у серпні 2023 року обвал крана в індійському місті Тхане призвів до численних жертв [2]. Аналогічний випадок стався в Італії у 2021 році, також з трагічними наслідками [3]. Статистика свідчить про те, що аварії з будівельними кранами є серйозною проблемою в багатьох країнах світу, зокрема в США та Австралії [4, 5]. В Китаї ця проблема також є актуальною, адже такі аварії часто мають важкі наслідки [6].

На жаль, статистика аварій за участю баштових кранів свідчить про значний вплив людського фактора. Помилки операторів, зумовлені втомою, втратою концентрації, неправильною оцінкою ситуації або порушенням правил безпеки, часто призводять до трагічних наслідків. Через значну висоту, на якій працюють крани, навіть незначні помилки можуть мати серйозні наслідки для робітників на землі та навколишньої інфраструктури. Тому питання мінімізації людського фактора та розробка ефективних систем захисту, які враховують можливі помилки операторів, є критично важливими для забезпечення безпеки на будівельних майданчиках.

Окремою проблемою є те, що професія кранівника не користується великою популярністю серед молоді, оскільки потребує тривалої підготовки, високої відповідальності та психологічної витривалості для роботи на значних висотах. Як наслідок, середній вік операторів баштових кранів є значно вищим, ніж у багатьох інших технічних професіях, таких як водії чи машиністи будівельної техніки.

В багатьох країнах середній вік кранівника перевищує 45-50 років, що створює додаткові ризики, пов'язані з людським фактором. Втома, зниження реакції, можливість засинання під час роботи, а також раптові погіршення стану здоров'я (наприклад, гіпертонічний криз або серцевий напад) є серйозними загрозами безпеці на будівельному майданчику. Оскільки кранівник працює у кабіні на великій висоті, надання йому невідкладної медичної допомоги в разі надзвичайної ситуації може бути ускладненим, що ще більше підвищує ризики.

Тому питання мінімізації людського фактора та розробка ефективних систем захисту, які враховують можливі помилки операторів, зумовлені віком та фізичним станом, є критично важливими для забезпечення безпеки на будівельних майданчиках.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасних умовах будівництва, де баштові крани є незамінними елементами, технології безпеки та моніторингу роботи відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки на майданчику. Завдяки інтеграції штучного інтелекту та цифрових технологій, сьогодні існують різноманітні системи, що дозволяють значно знизити ризики аварій та полегшити контроль за роботою кранів.

Один з прикладів таких систем – це використання технологій комп'ютерного зору для виявлення потенційних перешкод у радіусі дії крана[7]. Вони здатні в реальному часі аналізувати навколишнє середовище та автоматично коригувати рухи вантажу[8] або попереджати оператора про можливу небезпеку[9]. Такі системи, як правило, оснащені камерами (Рис.1), які фіксують навколишнє середовище, а алгоритми штучного інтелекту здатні розпізнавати статичні та динамічні об'єкти[10], що наближаються до крана. Інші системи використовують датчики для моніторингу стабільності конструкції та виявлення можливих змін у положенні крана[11], які можуть привести до його перевантаження або навіть падіння.



Рисунок 1 - Панель управління Liebherr EMS-4

Існують також технології прогностичного технічного обслуговування [12-13] для моніторингу стану крана в режимі реального часу, які передбачають використання датчиків для збору даних про стан механізмів крана, таких як двигуни, підйомні системи, троси та гідравлічні системи. Зібрані дані аналізуються за допомогою алгоритмів штучного інтелекту, що дозволяють виявити аномалії в роботі обладнання, які можуть вказувати на майбутні поломки. Це дає змогу здійснити своєчасне технічне обслуговування або заміну частин, перш ніж вони вийдуть з ладу, що значно знижує ризики аварій та підвищує ефективність роботи.

Незважаючи на те, що сучасні технології безпеки значно знизили кількість аварій, пов'язаних з технічними несправностями або зовнішніми обставинами, існуючі системи контролю не завжди адекватно враховують вплив людського фактора. Відомо, що значна частина аварій на будівельних майданчиках відбувається через помилки оператора, які можуть бути спричинені фізичною втомою, недосипом або неуважністю[14].

На сьогоднішній день автомобільна індустрія активно розвиває технології для підтримки водія, такі як системи розпізнавання сну та втоми, камери для відстеження рухів очей і т.д [15-17]. Такі системи запобігають аваріям на дорогах шляхом сповіщення водія про необхідність зупинки (Рис.2) або автоматичної активації системи безпеки в разі неуважності. Для операторів баштових кранів подібних технологій майже немає, що є особливо небезпечним, враховуючи, що вони працюють на великих висотах у складних умовах.



Рисунок 2 - Система розпізнавання втоми на автомобілях Volkswagen

Недостатність таких систем створює серйозну проблему. Враховуючи вищезгадані фактори, є очевидною необхідність розробки спеціалізованих систем для контролю фізичного та психологічного стану операторів кранів. Зокрема, необхідно створити технології, здатні контролювати наявність у свідомості оператора, виявляти симптоми сонливості чи втрати концентрації та вживати відповідних заходів, таких як автоматична зупинка роботи крана або сповіщення про потребу в паузі для відпочинку.

Таким чином, розробка і впровадження нових методів контролю, орієнтованих на фізіологічний стан оператора, може значно покращити безпеку при експлуатації баштових кранів і знизити кількість аварій, пов'язаних з людським фактором.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є розробка системи, що дозволяє автоматично відстежувати фізіологічний стан оператора баштового крана, зокрема виявляти сонливість або втрату свідомості, та запобігати аваріям, пов'язаним із людським фактором. Запропонована система повинна використовувати технології машинного бачення для відслідковування рухів очей оператора, аналізуючи їх стан і вживати заходів для забезпечення безпеки, таких як автоматична зупинка крана у разі відсутності реакції оператора.

Новизна дослідження полягає у впровадженні технологій машинного зору та штучного інтелекту для моніторингу фізіологічного стану оператора баштового крана в реальному часі. Це одне з перших досліджень, яке орієнтується на застосування таких технологій безпеки безпосередньо для баштових кранів. Використання цих інноваційних методів дозволяє значно підвищити рівень безпеки, вчасно реагуючи на зміни в стані оператора та запобігаючи аваріям, що можуть бути спричинені сонливістю чи втратою свідомості.

Основним завданням дослідження є створення та тестування системи, яка забезпечить постійний моніторинг стану оператора за допомогою технологій машинного бачення та штучного інтелекту. Це включає розробку алгоритмів для виявлення ознак сонливості або втрати свідомості, створення механізмів автоматичного реагування у разі відсутності реакції оператора, а також впровадження системи сповіщень для керівництва та медичних служб у разі критичних ситуацій.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для зменшення ризику аварій, що можуть бути спричинені сонливістю, втомою або недостатньою пильністю водія, вчені досліджують різні підходи до виявлення цих факторів. Існує дві основні групи методів виявлення сонливості. Перша група фокусується на аналізі поведінки водія, спостерігаючи за його діями для виявлення ознак сонливості [18-19]. Для цього використовуються показники, такі як поштовхи керма, що фіксують нестабільні рухи та стандартне відхилення бокового положення, що моніторить положення автомобіля в смузі руху. Друга група методів, відома як моніторинг стану водія, передбачає безпосереднє спостереження за фізичним станом водія. Цей підхід включає в себе методи обробки зображень для аналізу таких ознак, як закриті очі, позіхання або кивання головою. Також використовуються методи на основі фізіологічних сигналів, які відстежують зміни в серцевому ритмі або активності мозку як ознаки сонливості [20-21]. Комбінуючи ці підходи, вчені можуть розробити більш точні та ефективні системи для виявлення сонливості та підвищення безпеки водіїв.

Виявлення облич, особливо тих, де видно очі, є легкою задачею для людей, але стає складним завданням для комп'ютерів. Машинне навчання має ключову роль у виділенні потрібних елементів із складних умов, зокрема враховуючи такі фактори, як масштаб, орієнтація і освітлення. Крім того, технології виявлення облич мають різноманітні застосування, зокрема для моніторингу втом. У цьому напрямку дослідники, на чолі з Кортлі [22], поділили методи виявлення облич на чотири основні категорії. *Перша категорія* – модельні методи, які порівнюють моделі обличчя та його частин з кандидатами за допомогою кореляційних функцій. Альмабді та Ельрефаї [23] підкреслили важливість аналізу очей, хоча також зазначили можливі проблеми з точністю та обчислювальними витратами. *Друга категорія* – методи, орієнтовані на інваріантні характеристики, що дозволяють виявляти обличчя незважаючи на зміни в позі, освітленні та кутах огляду. *Третя категорія* – методи, які фокусуються на визначенні п'яти ключових рис обличчя для характеристики типової особи [22-24]. І нарешті, остання категорія – це підхід, що поєднує зовнішні ознаки та машинне навчання, який дозволяє швидко і точно застосовувати моделі, навчені на великій кількості зображень. Популярними методами виявлення об'єктів є алгоритм Віоли і Джонса (каскад Гаара) та гістограма орієнтованих градієнтів, запропонована Далалом і Трігтсом [26].

Зокрема, виявлення облич у реальному часі є однією з тих областей, де алгоритм Віоли-Джонса показує свої найкращі результати [25]. Процес складається з чотирьох етапів: проектування каскаду класифікаторів, навчання за методом AdaBoost, створення зображень та відбір характеристик типу Гаара. Завдяки простоті використання та швидкості обчислень, Віола і Джонс застосовують характеристики Гаара, які інколи називають характеристиками типу Гаара. Для пришвидшення обчислень характеристик вони використовують концепцію, що отримала назву інтегральних зображень. Це нововведення дозволяє значно підвищити ефективність обчислень характеристик, зменшуючи частоту сумування піксельних значень.



Рисунок 3-Характеристики Гаара, які використовуються для методу визначення обличчя Віоли-Джонса (а, б)

Характеристики типу Гаара, які застосовуються в алгоритмі Віоли-Джонса для виявлення облич зображені на Рис.3(а) [21]. Це прості прямокутні шаблони, які аналізують контрасти між різними частинами зображення, такими як область очей і щоки. Ці шаблони використовують чорні й білі прямокутники для позначення негативних та позитивних зон, що дозволяє алгоритму виявляти обличчя за рахунок порівняння світлих і темних областей. У свою чергу, типові зображення обличчя як вхід для виявлення характеристик зображено на Рис.3(б) [26]. Це зображення допомагає пояснити мету алгоритму: виявлення незмінних рис обличчя навіть при змінах виразу чи орієнтації, що підкреслює значення характеристик типу Гаара для точного розпізнавання облич.

Інтегральне зображення – уявлення запропоноване Віолою та Джонсом (Рис.4). Воно має такий самий розмір, як і початкове зображення, і на кожній точці містить суму пікселів, що розташовані вище і ліворуч від цієї точки, щоб прискорити обчислення характеристик. Ідея полягає в тому, щоб обчислювати суму пікселів лише один раз, що дозволяє зменшити кількість операцій і підвищити ефективність обчислень [21-24].

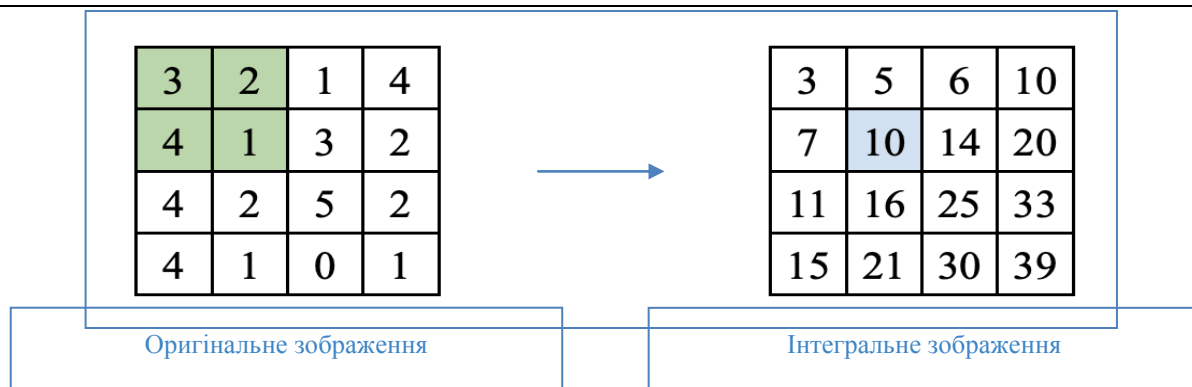


Рисунок 4-Перетворення оригінального зображення в інтегральне

Піксель у позиції (x, y) у інтегральному зображенні є сумою піксельних значень, що знаходяться вище та зліва від (x, y) в оригінальному зображенні. Наприклад синій (10) піксель інтегрального зображення (Рис.3), дорівнює сумі всіх зелених пікселів $(3+2+4+1)$ оригінального зображення, де $I_{\text{Інтр}}(x, y)$ — це інтегральне зображення в позиції (x, y) , яке представляє суму всіх пікселів оригінального зображення, $I_{\text{Ориг}}(x', y')$ до і включно з (x, y) . Загальна формула наведена (1):

$$I_{\text{Інтр}}(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} I_{\text{Ориг}}(x', y') \quad (1)$$

Каскадні класифікатори працюють поетапно, приймаючи важливі рішення: якщо підрегіон містить об'єкт, операція вважається завершеною і переходить до наступного етапу, якщо ні – відкидається. Згідно з Віолою та Джонсон, більшість підрегіонів, які дають негативний результат (не обличчя / не очі), можна швидко відхилити на ранніх етапах каскаду, що дозволяє зосередити увагу на позитивних прикладах (обличчя/очі). Однак каскад Гаара має кілька обмежень. По-перше, він може бути неефективним при виявленні обличчя при поганому освітленні, що призводить до високих рівнів хибних спрацьовувань або низької точності виявлення. Крім того, каскад Гаара може не зуміти виявити обличчя, які частково приховані, наприклад, за окулярами або капелюхами. Останнім обмеженням є труднощі з виявленням обличчя у зображеннях, де є великі зміни кута або складні вирази обличчя [25].

Метод гістограми орієнтованих градієнтів є потужним інструментом для виявлення об'єктів на зображеннях. Запропонований Далалом і Тріггсом у дослідженні "Гістограми орієнтованих градієнтів для виявлення людей" [26], цей метод передбачає розбиття зображення на клітини та обчислення орієнтації градієнтів для кожного пікселя. Далі будуються гістограми орієнтацій градієнтів для кожного блоку клітин, що дозволяє представити зображення у вигляді вектора дескрипторів гістограми орієнтованих градієнтів. Це подання використовують для навчання класифікаторів, таких як машини опорних векторів.

Спочатку, для спрощення процесу, зображення перетворюється в градацію сірого, а далі процес полягає у порівнянні темряви поточного пікселя з навколишніми, що допомагає визначити напрямок до більш темних областей. Аналізуючи зображення в квадратах по 16×16 пікселів, можна виявити основні патерни світла й темряви. Кількість градієнтів, спрямованих у різні напрямки, фіксується, і ці напрямки позначаються на зображенні. Для виявлення обличчя у цьому методі достатньо знайти частини зображення, які відповідають відомій моделі. Проте система може не помітити обличчя, орієнтовані під різними кутами, тому кожне зображення коригується так, щоб очі та губи були у протилежних напрямках. Це здійснюється за допомогою алгоритму "оцінка орієнтирів обличчя", що визначає 68 точок на обличчі, таких як верх підборіддя та краї очей. Нейронна мережа навчається виявляти ці точки, покращуючи точність системи.

Оскільки ефективне виявлення втоми кранівника значною мірою залежить від точності аналізу мімічних характеристик, важливим аспектом є вибір відповідного обладнання для обробки відеопотоку в реальному часі. Системи, що застосовують методи розпізнавання обличчя та аналізу стану очей, потребують високої обчислювальної потужності та швидкодії, особливо в умовах змінного освітлення та різних положень голови. Саме тому у цьому дослідженні було обрано апаратну платформу, здатну забезпечити швидку та стабільну роботу алгоритмів виявлення втоми.

Серед різних варіантів електронних плат для роботи із зображеннями було вирішено використовувати Raspberry Pi 4 Model B через його високу продуктивність. Ця плата оснащена

64-бітним чотириядерним процесором із частотою 1,5 ГГц та має 2 ГБ оперативної пам'яті, а також підтримує Wi-Fi, Bluetooth, порти USB 3.0 та 40-контактний роз'єм GPIO. Завдяки компактним розмірам (85×56×16 мм) і доступній вартості вона стала оптимальним вибором. Живлення пристрою здійснюється від бортової мережі баштового крану через блок живлення.

Функціональна схема системи для моніторингу стану оператора баштового крану, наведена на Рисунку 5 та ілюструє принцип її роботи. Центральним елементом виступає плата Raspberry Pi 4 Model B, до якої підключені основні компоненти, зокрема камера для спостереження за кранівником і модуль оповіщення, що сигналізує про виявлену втому. За допомогою промовних інтерфейсів таких як RS-232 або RS-485 плата підключається до програмованого логічного контролера (ПЛК) який управляє приводами баштового крану і у разі небезпеки зупиняє його роботу. Ця система поєднує технології обробки зображень і комунікації, створюючи ефективний механізм підвищення безпеки кранівника.

Пристрій у реальному часі розпізнає обличчя кранівника за допомогою камери (Рис.5). Алгоритм, розроблений на мові Python із використанням бібліотеки OpenCV, аналізує ознаки втоми або сонливості. У разі виявлення ознак перевтоми активується візуальне сповіщення, а за необхідності – звуковий сигнал. Для додаткової безпеки можуть бути застосовані розширені функції, зокрема автоматичне вмикання аварійних вогнів для привернення уваги інших працівників або надсилання екстреного SMS керівництву чи медичній службі.



Рисунок 5-Функціональна схема системи для моніторингу стану оператора баштового крану

Після встановлення операційної системи Raspbian, бібліотеки OpenCV та іншого необхідного програмного забезпечення, система на базі Raspberry Pi 4 була інтегрована в кабінку баштового крану для проведення експериментальних випробувань. До плати були підключені камера для моніторингу оператора, модуль звукової сигналізації. Головною метою тестування було оцінити ефективність розпізнавання стану оператора за допомогою аналізу його обличчя та поведінкових факторів.

На першому етапі система аналізувала відеопотік з камери для ідентифікації оператора крана та відокремлення його обличчя від навколишнього середовища. Далі, застосовуючи методи машинного зору та алгоритми аналізу орієнтації голови, проводилося визначення напрямку погляду оператора. Якщо виявлялося, що оператор має ознаки сонливості або втрати свідомості, система активувала попередження. На Рисунку 6 представлена загальна структура такої системи.

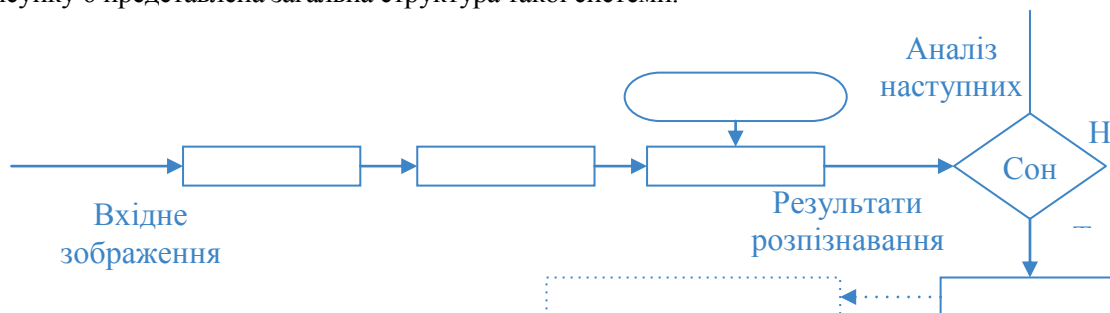


Рисунок 6-Процес моніторингу стану оператора баштового крану

На рисунку 7 показана початкова конфігурація системи в кабіні баштового крану, де систему було закріплено у зручному місці для забезпечення належного огляду камери. Оператор працює в звичайному режимі, і система відстежує його рухи за допомогою методів розпізнавання обличчя та ключових точок. Якщо оператор відволікається, наприклад, довго не відкриває очі, система активує візуальне попередження.

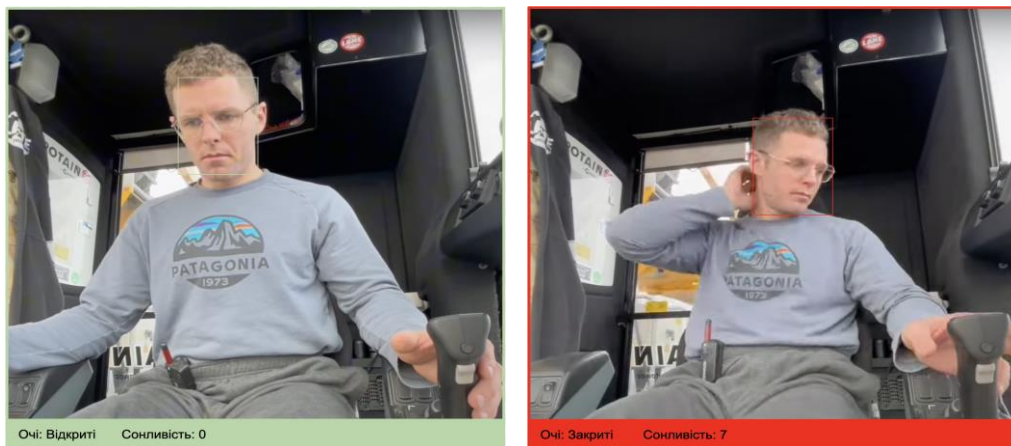


Рисунок 7, 8-Оператор працює в звичайному режимі та сонливого вигляді (система розпізнала сонливість оператора)

На рисунку 8 показано ситуацію, коли оператор починає відчувати сонливість. Система фіксує, що очі оператора не розпізнаються або розпізнаються зачиненими впродовж більш 5 секунд. У таких випадках автоматично вмикається звукова сигналізація.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Система також була протестована в умовах недостатнього освітлення, що є критичним для роботи в нічний час або у приміщеннях з обмеженим доступом до світла. Випробування показали, що алгоритми ефективно розпізнавали ознаки втоми навіть у складних умовах освітлення, що значно підвищує безпеку операторів під час тривалих змін.

На завершальному етапі було протестовано ситуації, коли обличчя оператора не виявлялося камерою. Якщо система не розпізнавала обличчя під час роботи крана, вона активувала аварійне попередження, що могло свідчити про можливу втрату свідомості або вихід оператора з кабіни під час роботи механізму. У разі, якщо кран перебував у стані спокою, система залишалася в режимі очікування, продовжуючи відстежувати наявність оператора в кабіні. Такі експерименти підтвердили ефективність системи моніторингу стану оператора баштового крана, що дозволяє значно знизити ризики, пов'язані з втомою або неуважністю, та підвищити загальний рівень безпеки на будівельних майданчиках.

ВИСНОВКИ

Робота оператора баштового крана дійсно пов'язана з високими вимогами до концентрації уваги та відповідальності, оскільки навіть незначна помилка може призвести до серйозних наслідків. Це завдання стає особливо складним для працівників старшого віку, які через фізіологічні зміни можуть мати знижену стійкість до стресу, втому або інші проблеми, що безпосередньо впливають на їх здатність до ефективного управління краном.

Ураховуючи, що робота на значній висоті пов'язана з високим рівнем ризику для життя та здоров'я, помилки можуть мати не лише фінансові, але й людські наслідки. Саме тому впровадження систем, що забезпечують моніторинг стану оператора в реальному часі, є життєво важливим, що дозволяє не лише своєчасно виявляти ознаки втоми або сонливості, а й надавати можливість для автоматичної реакції в разі критичної ситуації. Розробка і впровадження системи машинного зору, яка аналізує фізіологічні показники оператора (зокрема, рухи голови, вираз обличчя або фіксацію зору), дозволяє своєчасно виявляти небезпечні стани, такі як втома чи сонливість. Інтеграція такої системи з автоматизованими системами управління краном дозволяє не тільки попереджати оператора про небезпеку, а й автоматично зупиняти роботу крана або вживати інші необхідні заходи для запобігання аварії. Наприклад, зупинка роботи крана або сповіщення відповідних служб може бути здійснено у разі виявлення критичних ознак втрати свідомості або інших загроз для безпеки.

Таким чином, розробка та впровадження подібних систем є важливим кроком до підвищення безпеки на робочих майданчиках, зниження людських помилок та забезпечення належного рівня захисту як для оператора, так і для оточуючих.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціональності системи, зокрема на врахування інших факторів, що впливають на стан оператора (наприклад, температура чи рівень кисню в кабіні), а також на інтеграцію з іншими системами безпеки на будівельному майданчику для створення комплексної системи захисту.

REFERENCES

1. Abu, M. A., Ishak, I. D., Basarudin, H., Ramli, A. F., Shapiai, M. I. (2022). Fatigue and drowsiness detection system using artificial intelligence technique for car drivers. *Advanced Structured Materials*, 167, 421–430. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89988-2_31. [in English].
2. Albadawi, Y., Takruri, M., Awad, M. (2022). A review of recent developments in driver drowsiness detection systems. *Sensors*, 22(5), 2069. [in English].
3. Almadby, S., Elrefaei, L. (2019). Deep convolutional neural network-based approaches for face recognition. *Applied Sciences*, 9, 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9204397>. [in English].
4. Alnaggar, M., Siam, A. I., Handosa, M., Medhat, T., Rashad, M. Z. (2023). Video-based real-time monitoring for heart rate and respiration rate. *Expert Systems with Applications*, 225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120135>. [in English].
5. Chen, J., Chi, H.-L., Du, Q., Wu, P. (2022). Investigation of Operational Concerns of Construction Crane Operators: An Approach Integrating Factor Clustering and Prioritization. *Journal of Management in Engineering*, 38. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0001044](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001044). [in English].
6. China News. A Crane Collapse Accident Occurred in Turin, Italy, Resulting in 3 Deaths and 3 Injuries. (2021). Retrieved from: <https://www.chinanews.com.cn/gj/2021/12-20/9633902.shtml>. [in English].
7. China News. Crane Collapse in Western India Kills 20 and Injures 3. (2023). Retrieved from: <https://www.chinanews.com.cn/gj/2023/08-02/10054165.shtml>.
8. Elngar, A. A., Arafa, M., Naeem, A. E. R. A., Essa, A. R., Shaaban, Z. A. (2021). The Viola-Jones face detection algorithm analysis: A survey. *Journal of Cybersecurity and Information Management*, 85–95. DOI: <https://doi.org/10.54216/JCIM.060201>. [in English].
9. Hasan, M. K., Ahsan, M. S., Mamun, A.-A., Newaz, S. H. S., Lee, G. M. (2021). Human face detection techniques: A comprehensive review and future research directions. *Electronics*, 10, 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10192354>. [in English].
10. Hu, S., Fang, Y., Moehler, R. (2023). Estimating and visualizing the exposure to tower crane operation hazards on construction sites. *Safety Science*, 160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106044>. [in English].
11. Hussain, M., Ye, Z., Chi, H. L., Hsu, S. C. (2024). Predicting degraded lifting capacity of aging tower cranes: A digital twin-driven approach. *Advanced Engineering Informatics*, 59, 102310. [in English].
12. Hussein, M., Zayed, T. (2021). Crane operations and planning in modular integrated construction: Mixed review of literature. *Automation in Construction*, 1. 122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103466>. [in English].
13. Johns, B., Abdi, E., Arashpour, M. (2023). Crane payload localisation for curtain wall installation: A markerless computer vision approach. *Measurement*, 221. P. 113459. [in English].
14. Kortli, Y., Jridi, M., Falou, A. A. Atri, M. (2020). Face recognition systems: A survey. *Sensors*. 20, 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20020342>. [in English].
15. Lee, J., Lee, S. (2023). Construction site safety management: a computer vision and deep learning approach. *Sensors*, 23, 2, 944. [in English].
16. Ngxande, M., Tapamo, J.-R., & Burke, M. (2017). Driver drowsiness detection using behavioral measures and machine learning techniques: A review of state-of-art techniques. *Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics (PRASA-RobMech)*, 156-161. [in English].
17. Patel, C. I., Labana, D., Pandya, S., Modi, K., Ghayvat, H., Awais, M. (2020). Histogram of oriented gradient-based fusion of features for human action recognition in action video sequences. *Sensors*, 20, 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247299>. [in English].
18. Pazari, P., Didehvar, N., Alvanchi, A. (2023). Enhancing Tower Crane Safety: A Computer Vision and Deep Learning Approach. *Engineering Proceedings*, 53, 1, 38.
19. Radlov, K., Ivanov, G. (2020). Analysis of accidents with tower cranes on construction sites and recommendations for their prevention. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 951, 1, 012025. IOP Publishing. [in English].

20. Rahmad, C., Asmara, R. A., Putra, D. R. H., Dharma, I., Darmono, H., Muhiqqin, I. (2020). Comparison of Viola-Jones Haar cascade classifier and histogram of oriented gradients (HOG) for face detection. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/732/1/012038>. [in English].
21. Saleem, S., Shiney, J., Shan, B. P., Mishra, V. K. (2023). Face recognition using facial features. Materials Today: Proceedings, 80, 3857–3862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.402>. [in English].
22. Sikander, G., Anwar, S. (2019). Driver fatigue detection systems: a review. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20, 6, 2339–2352. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2868499>. [in English].
23. Stancin, I., Cifrek, M., & Jovic, A. (2021). A review of EEG signal features and their application in driver drowsiness detection systems. Sensors, 21(11), 3786. [in English].
24. Xiong, G., Helo, P., Ekström, S., Shen, Z. A. (2024). Service-Oriented Autonomous Crane System. IEEE Transactions on Computational Social Systems. [in English].
25. Yong, Y. P., Lee, S. J., Chang, Y. H., Lee, K. H., Kwon, S. W., Cho, C. S., Chung, S. W. (2023). Object detection and distance measurement algorithm for collision avoidance of precast concrete installation during crane lifting process. Buildings, 13, 10, 2551. [in English].
26. Zhang, X., Zhang, W., Jiang, L., Zhao, T. (2020). Identification of Critical Causes of Tower-Crane Accidents through System Thinking and Case Analysis. Journal of Construction Engineering and Management, 146. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001861). [in English].

V. Stefanov, I. Dzerzhynskiy. Optimization of tower crane operation using automated control systems.

The article discusses the process of optimizing the operation of a tower crane through the implementation of automated control systems. The main advantages of automation are analyzed, including improved crane efficiency, reduced risks of human errors, and decreased maintenance costs. Special attention is given to modern technologies that enable precise control of lifting and load-moving processes, as well as the integration of monitoring and equipment diagnostics systems. The implementation of such systems significantly improves productivity, ensures safety, and reduces the impact of the human factor on the operation of the tower crane.

The paper also examines the impact of the human factor on the performance of tower cranes and the potential for its reduction through the introduction of machine vision systems. The risks associated with human errors and their effect on safety and productivity are analyzed. The principles of operation of machine vision systems, their technical capabilities, and advantages in crane control automation are outlined, particularly for monitoring the work zone, determining safe load-moving trajectories, and minimizing collision risks. Methods for implementing these systems using cameras, sensors, and deep learning algorithms are discussed. The effectiveness of algorithms, such as convolutional neural networks (CNN), and the technical challenges arising from the integration of these technologies are explored. The results demonstrate that machine vision systems improve safety, reduce operator workload, and enhance crane operation efficiency.

The introduction of machine vision systems is an important step towards improving safety, increasing efficiency, and reducing the workload on operators during tower crane operations. Furthermore, these systems can define safe load-moving trajectories, minimizing the potential for collisions or damage.

Key words: tower crane, accidents, human factor, monitoring, machine vision, drowsiness, artificial intelligence, security system.

СТЕФАНОВ Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту e-mail: vstef@ukr.net. ORCID ID: 0000-0002-7947-2718.

ДЗЕРЖИНСЬКИЙ Ігор Віталійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту e-mail: dzerzhynskiy@gmail.com. ORCID ID: 0009-0009-7188-2948.

Volodymyr STEFANOV, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines of the Ukrainian State University of Railway Transport e-mail: vstef@ukr.net. ORCID ID: 0000-0002-7947-2718.

Ihor DZERZHYNISKYI, postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines of the Ukrainian State University of Railway Transport e-mail: dzerzhynskiy@gmail.com. ORCID ID: 0009-0009-7188-2948.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1748

Форнальчик Є.Ю., Гілевич В.В.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ДО ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ

Сьогодні, як і в усі часи, у сфері обслуговування на перше місце ставиться якість і оперативність виконання послуг, у цьому разі на перевезення вантажів. Критерієм ефективності використання транспортних засобів під час перевезення вантажів є своєчасність доставки зі збереженням їх якісних показників. На перевезення впливає значна кількість факторів, зокрема тип і якість дорожніх покриттів, інтенсивність руху транспортних потоків, стаж водіїв з певними їх психофізіологічними властивостями, безпечна швидкість перевезень тощо, які впливають на ефективність перевізних процесів. Найбільш недостатньо вивченими та обґрунтованими є терміни доставки вантажів, які напряму пов'язані з швидкістю руху перевізника на конкретних маршрутах.

Автори використали швидкість перевезень, яка безпосереднім чином впливає на продуктивність автомобілів, що перевозять вантажі з відповідним завантаженням. На прикладі продуктивності перевезень (за обсягами перевезень) показано, що чинна методика визначення її повинна коригуватися на основі обґрунтованої швидкості перевезень з тим, щоб адекватно оцінювати якість обслуговування.

Під впливом змінної швидкості транспортних засобів на маршруті знайдена продуктивність є меншою, ніж, якщо вона приймається постійною. Визначена, з урахуванням задекларованого підходу продуктивність, адекватніше оцінюватиме якість обслуговування перевезеннями вантажів. Отриманий результат вказує на те, що ця швидкість повинна обґрунтовуватися у першу чергу, оскільки вона є визначальною в адекватному оцінюванні продуктивності та якості обслуговування

Ключові слова: вантажні перевезення, транспортний засіб, швидкість руху, якість обслуговування, продуктивність.

ВСТУП

Скорочення термінів доставки вантажів досягають в основному за рахунок мінімізації технологічного циклу перевезень. Якщо ідеться про основну компоненту циклу – безпосередній рух транспортного засобу (ТЗ) від вантажовідправника до вантажоотримувача (займає близько 95% загальної тривалості циклу), то, як показують результати багаточисельних досліджень та практичний досвід, усе зводиться не тільки до визначення тривалості руху між ними, але й до визначення продуктивності ТЗ на перевезеннях. У цьому полягає проблематика в оцінюванні ефективності і якості обслуговування як замовників на перевезення вантажів, так і перевізників. Очевидно, що чим з більшою швидкістю відбувається рух ТЗ відповідної вантажності на маршруті, тим вища продуктивність його. Оскільки вантажність залежить безпосередньо від конструкції ТЗ, то швидкість – від умов та режимів руху на маршруті перевезень. Викладене вказує на актуальність і потребу поглибити дослідження впливу швидкості ТЗ на продуктивність цього перевізного процесу.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Умови та режими руху ТЗ характеризуються впливом різних чинників, серед яких основні: тип і якість дорожніх покриттів з відповідним індексом рівності; інтенсивність руху транспортних потоків (ТП), у яких розглядувані ТЗ з підтриманням її водіями у відповідному діапазоні (останнє залежить від водійського стажу та психофізіологічних напружень водіїв під час перевезень); структура ТП (з відповідним співвідношенням у ньому легкових, вантажних автомобілів, автопоїздів); вплив погодних умов (мокре дощове чи снігове покриття), які зумовлюють, крім «згущень» у ТП, і вибір відповідних швидкостей ТЗ з умов безпеки руху, зокрема на відповідних ділянках мережі між населеними пунктами [1].

Визначальним критерієм ефективності використання ТЗ під час перевезення вантажів є своєчасність доставки зі збереженням їх якісних показників. Серед основних характеристик вантажних перевезень загально визнано якість транспортного обслуговування, яка передбачає передовсім швидкість і терміни доставки та збереження вантажів, забезпечення безпеки і екології перевезень. Загальний середній рівень якості визначають за сукупністю перелічених показників [2]:

$$K_{\text{заг}} = \sum (k_i \cdot \alpha_i), \quad (1)$$

де k_i – рівень конкретного показника якості; α_i – питома частка цього показника серед інших розглянутих.

Не завжди і не для усіх варіантів і схем технологічних процесів перевезень ці показники мають відповідні теоретичні та практичні обґрунтування й тому отримуваний рівень якості задоволення цих транспортних послуг часто далекий від потрібного (сподіваного). Найбільш недостатньо вивченими та обґрунтованими є терміни доставки вантажів, які напряму пов'язані з швидкістю руху перевізника на конкретних маршрутах. Нормативів для неї немає, оскільки вона залежить від впливу великої кількості чинників, керувати якими цілеспрямовано практично не можливо.

Очевидно, що якщо вибір меж показників, які характеризують транспортний засіб і вантажі, не викликає особливих сумнівів, то швидкість перевезень на різних маршрутах повинна мати відповідне обґрунтування. Так само, як і професійні можливості водія. Раніше був досліджений взаємозв'язок між змінами технічної швидкості транспортних засобів і умовами руху у межах міста [3]. На підставі результатів встановлено, що збільшення технічної швидкості можливе за рахунок довжини маршруту. Однак, впливати на це таким чином не завжди можливо внаслідок того, що довжина маршруту визначається місцем розташування вантажовідправника та вантажоотримувача.

Крім цього, досліджувалась ергономічна стійкість транспортних потоків на різних ділянках вулично-дорожньої мережі (ВДМ) [4]. Серед факторів, які впливають на цю стійкість, є такі: градієнти швидкості ТЗ, щільності та швидкості ТП, динамічні властивості ТЗ, кількість смуг на ВДМ, затримки на пішохідних та транспортних переходах. Обґрунтовано параметри, які характеризують реакцію ТП на вплив перерахованих факторів. Виявлено також вплив показника активності регуляторних систем водія, зростання якого може також призвести до збільшення технічної швидкості ТЗ [5-7 та інші]. Однак підвищувати швидкість ТЗ з використанням цього показника не завжди оправдано, оскільки зі збільшенням напруги водія можливе збільшення імовірності виникнення дорожньо-транспортної події [8].

Сьогодні визначальна частка вантажних перевезень припадає на автомобільний транспорт, маршрути якого пролягають у містах, між містами, державами (будівельні матеріали, харчова продукція, вироби легкої та важкої промисловості, паливо-мастильні матеріали тощо). Вчасна доставка вантажів замовникам відіграє першорядне завдання. Чим скоріше доставлені вантажі, тим швидше автомобіль повертається у початковий пункт вантажовідправника.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою у цьому дослідженні є встановлення впливу швидкості руху ТЗ на маршруті перевезень на продуктивність його (як узагальнений показник), яким можна оцінювати, у т.ч. оперативність і якість обслуговування замовників. Для досягнення мети розв'язуються такі задачі: аналіз відомої формули для визначення продуктивності ТЗ за обсягами перевезень вантажів; порівняльний аналіз результатів розрахунків продуктивності за згаданою формулою на основі рекомендованих нормативів початкових даних та за реальними (для конкретних маршрутів перевезень) показниками; обґрунтувати основний показник, яким забезпечуватиметься оперативність обслуговування замовників вантажів – середню технічну швидкість ТЗ на маршруті.

З урахуванням вимог щодо оперативності обслуговування замовників вантажів важливо оцінити при цьому продуктивність ТЗ на маршруті, за яким вантаж доставляється замовникові. Відомо, що її визначають, наприклад, за обсягами перевезень, за такою формулою [9]:

$$W_Q = \frac{q \cdot \gamma_c \cdot V_m \cdot \beta_i}{L_m + t_{n-p} \cdot V_m \cdot \beta_i}, \text{ т/год}, \quad (2)$$

де q – вантажність ТЗ, т; γ_c – статичний коефіцієнт використання вантажності ТЗ; V_m – середня технічна швидкість ТЗ на маршруті перевезення вантажів, км/год.; β_i – коефіцієнт використання пробігу ТЗ на маршруті; L_m – довжина маршруту, км; t_{n-p} – тривалість навантажувально-розвантажувальних операцій (навантаження вантажів у вантажовідправника, розвантаження у вантажоотримувача) год.

У розрахунках кожен із показників відповідним чином обґрунтовують: вантажність за технічною характеристикою ТЗ; статичний коефіцієнт γ_c – на скільки використовується вантажність ТЗ на перевезенні певних видів вантажів з урахуванням типів маршрутів (міські, міжміські, міжнародні); беруть у межах 0,80-0,98; середня технічна швидкість ТЗ на маршруті, приймають у межах 60-75 км/год; довжини маршрутів перевезень – за фактичною відстанню між кореспондуючими пунктами, км; тривалість t_{n-p} нормується залежно від виду вантажів і

механізовано-ручних операцій (діапазон цієї тривалості може бути у межах 0,50-0,80 год.); коефіцієнт використання пробігу ТЗ на маршруті залежить від типу його (маятниковий, кільцевий тощо), у розрахунках приймають у межах 0,5 для маятникових маршрутів до 1,0 якщо, наприклад, маршрут розвізно-збірний.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянемо визначення продуктивності перевезення вантажів, для прикладу, у межах Львівської приміської зони автомобілем Mercedes-Benz Sprinter 519 масою 3,0 т на відстань 30 км (між населеними пунктами Львів – Жовква) зі статичним коефіцієнтом вантажності 0,95 і тривалістю навантажувально-розвантажувальних операцій 0,5 год та коефіцієнтом використання пробігу 0,5 (маятниковий маршрут) і вважати, що середня експлуатаційна швидкість цього ТЗ на маршруті становитиме 60 км/год, то він може працювати з продуктивністю, $W_Q = 1,90$ т/год.

У ранішому дослідженні швидкості ТЗ, було встановлено найбільше зниження її за збільшення кількості перехресть на маршруті у межах міста [10]. Кінцевим результатом у ньому виявлено вплив на швидкість семи факторів: довжина маршруту перевезень вантажів, L_m , км; показник активності регуляторних систем водія, P_{pc} ; швидкість транспортного потоку (V_n), у якому рухається вантажний ТЗ, км/год; стаж водія за кермом цього ТЗ, S_g , років; коефіцієнт використання вантажності ТЗ, γ_c ; кількість перехресть (регульованих і нерегульованих) на маршруті перевезень, K_{nep} ; питома потужність двигуна цього ТЗ, W_{nut} , кВт/т. З урахуванням їх розроблено регресійну модель [10]:

$$V_m = 0,001L_m + 2,21P_{pc} + 0,1V_n + 0,27S_g - 4,82\gamma_c - 0,45K_{nep} + 0,33W_{nut}, \text{ км/год.} \quad (3)$$

Автори роблять висновок про можливість використання отриманої моделі для визначення змін середньої технічної швидкості від впливу зазначених факторів і врахування цього у розрахунках (проектуванні) параметрів технологічного процесу перевезення вантажів.

До наведеного вище прикладу з перевезення вантажів на маршруті Львів – Жовква та з урахуванням професійного стажу водія 10 років, у якого показник активності регуляторних систем рівний 5 і на цьому шляху (30 км) транспортний потік рухається із середньою швидкістю 60 км/год і має перетини з п'ятьма перехрестями, а питома потужність двигуна цього ТЗ 46,67 кВт/т, знайдемо середню технічну швидкість:

$$V_m = 0,001 \cdot 30 + 2,21 \cdot 5 + 0,1 \cdot 60 + 0,27 \cdot 10 - 4,82 \cdot 0,95 - 0,45 \cdot 5 + 0,33 \cdot 46,67 = 28,35 \text{ км/год.}$$

Отриманий результат виявився меншим, порівняно із швидкістю, яку прийняли без обґрунтування.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Очевидно (див. формулу 3), що причиною цьому у найбільшій мірі є швидкість транспортного потоку, водійський стаж, кількість перехресть, а також показник активності регуляторних систем водія. Аналізом маршруту перевезень встановлено, що середня технічна швидкість ТЗ не може перевищувати 60 км/год, оскільки він пролягає через 6 населених пунктів, проїзд яких обмежений з швидкістю 50 км/год. Він також перетинає 5 перехресть (одне регульоване, 4 нерегульовані) та 10 нерегульованих пішохідних переходів. Крім цього, на маршруті встановлені 18 дорожніх знаків, які обмежують швидкість руху ТЗ. На практиці майже усі водії ігнорують перераховані обмеження. Усе перераховане, звісно, повинно адекватно сприйматися водієм, щоб забезпечити безпечний рух та збереження якісних характеристик вантажу, що перевозиться. У зв'язку з цим вибрано 10-річний стаж роботи водія з відповідно 5-м рівнем активності його регуляторних систем.

З урахуванням дії перерахованих факторів виходить, що середня технічна швидкість ТЗ значно менша, ніж прийнята у розрахунку його продуктивності ($60 - 28,35 = 31,65$ км/год). Якщо підставити отримане значення швидкості $V_m = 28,35$ км/год у формулу (2), продуктивність ТЗ за обсягами перевезень становитиме:

$$W_Q = \frac{3,0 \cdot 0,95 \cdot 28,35 \cdot 0,5}{30 + 0,5 \cdot 28,35 \cdot 0,5} = 1,09 \text{ т/год.}$$

Тобто, фактична продуктивність на перевезеннях вантажів (на прикладі автомобіля Mercedes-Benz Sprinter 519) на цьому маршруті є меншою на 0,81 т/год, порівняно з тим, якщо приймати середню технічну швидкість руху між кореспондуючими пунктами без належного обґрунтування. Отриманий результат вказує на те, що ця швидкість повинна обґрунтовуватися у першу чергу, оскільки вона є визначальною в адекватному оцінюванні продуктивності та якості обслуговування. До цього ж, методика визначення продуктивності вантажних перевезень повинна бути переглянута і внесені відповідні доповнення з акцентом на обґрунтовану середню технічну швидкість ТЗ.

ВИСНОВКИ

Встановлено (на прикладі продуктивності ТЗ на обсягами перевезень), що використання під час планування і контролю перевезень рекомендованих нормативів, які входять у формулу для визначення продуктивності ТЗ, не відповідають фактичним результатам її. Порівняльний аналіз цієї продуктивності з продуктивністю ТЗ, для якої обґрунтовані показники, зокрема швидкість руху ТЗ, показав, що фактична продуктивність є меншою від тої, яку розраховують за рекомендованими нормативами. Задекларована на початку статті якість обслуговування вантажоотримувачів напругу вказує на потребу визначення термінів доставки вантажів, які повинні передовсім володіти обґрунтованими значеннями швидкості руху ТЗ на маршруті перевезень. За відсутності цього вантажоотримувач не буде мати сподіваних результатів своєї майбутньої (після отримання вантажів) діяльності.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вознюк А.Б. Удосконалення методу прогнозування аварійно-небезпечних ділянок на мережі автомобільних доріг: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Київ, 2021. 226 с. URL: http://diser.ntu.edu.ua/Vozniuk_dis.pdf.
2. Луб'яний П.В., Войтович О.А., Моспан В.М., Моспан Н.В. Управління якістю транспортного обслуговування. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 3. С. 68-74. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.9>.
3. Ву Дик Мінх. Підвищення ефективності організації дорожнього руху в транспортних районах міста: дис. ... доктора філософії: 275 Транспортні технології (за видами). Харків, 2021. 205 с. URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/Захисти_PhD/Дисертація_Мінх.pdf.
4. Войтов В.А., Кравцов А.Г., Карнаух М.В., Горяїнов О.М., Козенок А.С., Бабич І.А. Оцінка ергономічної стійкості транспортних потоків на ділянках дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7 (38), ч.1. С. 236-244. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245).
5. Жук М.М., Ковалишин В.В. Аналіз методів дослідження функціонального стану водія і показників його діяльності. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2011. № 5/2 (53). С. 12-15. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/957/862>.
6. Постранський Т.М., Кривенчук Ю.П. Психофізіологічні властивості водія та безпека дорожнього руху: монографія. Львів: Видавництво Тараса Сороки, 2022. 192 с.
7. Fornalchyk Ye., Afonin M., Postranskyu T. & Boikiv M. Risk assessment during the transportation of dangerous goods considering the functional state of the driver. *Transport problems*. 2021. Vol. 16(1). P. 139-152. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-012>.
8. Гюлев Н.У., Доля В.К., Бичев М.С. Про вплив зміни функціонального стану водія на безпеку дорожнього руху. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. № 3/3 (63). С. 67-69. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/14742/12520>.
9. Дмитриченко М.Ф., Яцківський Л.Ю., Ширяєва С.Ф., Докуніхін В.З. Основи теорії транспортних процесів і систем: навч. посіб. Київ: Видавничий Дім «Слово», 2009. 336 с.
10. Galkin A., Davidich N., Melenchuk T., Kush Ye., Davidich Yu. & Lobashov O. Modelling Truck's Transportation Speed on the Route Considering Driver's State. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 30. P. 207-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.023>.

REFERENCES

1. Vozniuk A.B. (2021). *Improving the method of predicting emergency-dangerous areas on the road network*. Candidate's thesis. Kyiv: National Transport University [in Ukrainian]. URL: http://diser.ntu.edu.ua/Vozniuk_dis.pdf.
2. Lubiany P.V., Voitovych O.A., Mospan V.M. & Mospan N.V. (2024). Transport service quality management. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 3, 68-74 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.9>.

3. Vu Dyk Minh. (2021). Improvement of traffic management efficiency in transport zones of a city. PhD dissertation. Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Highway University [in Ukrainian]. URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/Захисти_PhD/Дисертація_Мінь.pdf.
4. Voitov V.A., Kravtsov A.H., Karnaukh M.V., Horiainov O.M., Kozenok A.S. & Babych I.A. (2023). Assessment of ergonomic stability of traffic flows on sections of the road network. Identification of a mathematical model. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 7 (38), part 1, 236-244 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245).
5. Zhuk M.M. & Kovalyshyn V.V. (2011). Analysis of methods for studying the functional state of a driver and indicators of his activity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/2 (53), 12-15 [in Ukrainian]. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/957/862>.
6. Postranskyi T.M. & Kryvenchuk Yu.P. (2022). *Psychophysiological properties of the driver and road safety*. Lviv: Vydavnytstvo Tarasa Soroky [in Ukrainian].
7. Fornalchyk Ye., Afonin M., Postranskyi T. & Boikiv M. (2021). Risk assessment during the transportation of dangerous goods considering the functional state of the driver. *Transport problems*, 16(1), 139-152. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-012>.
8. Hiuliev N.U., Dolia V.K. & Bychev M.S. (2013). On the influence of changes in the driver's functional state on road safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/3 (63), 67-69 [in Ukrainian]. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/14742/12520>.
9. Dmytrychenko M.F., Yatskiivskiy L.Iu., Shyriaieva S.F. & Dokunikhin V.Z. (2009). *Fundamentals of the theory of transport processes and systems*. Kyiv: Vydavnychi Dim «Slovo» [in Ukrainian].
10. Galkin A., Davidich N., Melenchuk T., Kush Ye., Davidich Yu. & Lobashov O. (2018). Modelling Truck's Transportation Speed on the Route Considering Driver's State. *Transportation Research Procedia*, 30, 207-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.023>.

Ye. Fornalchyk, V. Hilevych. To determining the level of service of cargo transportation

Today, as at all times, the quality and efficiency of services, in this case, cargo transportation, are of paramount importance in the service sector. The criterion for the efficiency of using vehicles in cargo transportation is the timeliness of delivery while maintaining their quality indicators. Transportation is influenced by a many factors that affect the efficiency of transportation processes, including the type and quality of road surfaces, traffic volume, driver experience with specific psychophysiological properties, safe transportation speed, etc. The most insufficiently studied and substantiated are the terms of cargo delivery, which are directly related to the speed of the carrier on specific routes.

The authors used the speed of transportation, which directly affects the productivity of vehicles transporting goods with the respective load. The example of transportation productivity (in terms of transportation volumes) shows that the current methodology for determining it should be adjusted based on a reasonable transportation speed to assess service quality adequately.

Under the influence of the variable speed of vehicles on the route, the found productivity is lower than if it is assumed to be constant. Considering the declared approach, the productivity determined will more adequately assess the quality of cargo transportation services. This result indicates that this speed should be justified in the first place, as it is crucial for an adequate assessment of productivity and quality of service.

Keywords: cargo transportation, vehicle, speed of movement, quality of service, efficiency.

ФОРНАЛЬЧИК Євген Юліанович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: yevhen.y.fornalchyk@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4137-0625.

ГІЛЕВИЧ Володимир Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: volodymyr.v.hilevych@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-8873-7522.

Yevhen FORNALCHYK, Doctor of Engineering Sciences, Professor at Transport Technologies Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: yevhen.y.fornalchyk@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4137-0625.

Volodymyr HILEVYCH, PhD, Associate Professor at Transport Technologies Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: volodymyr.v.hilevych@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-8873-7522.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1749

Холодова О.О., Бугайова М.О.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна***ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЇЗДУ ДІЛЯНКИ ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ МІСТА З
УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ПРИПАРКОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Перевантаженість проїзної частини через хаотичне паркування суттєво знижує пропускну спроможність доріг, спричиняючи затори, підвищуючи середній час затримки руху транспортних засобів та збільшуючи ризик дорожньо-транспортних пригод.

Наявність припаркованих автомобілів обмежує маневреність транспортного потоку, зменшує ефективність використання дорожнього простору та створює додаткові труднощі для громадського транспорту. Для оцінки впливу паркування на пропускну спроможність використано методику, згідно з якою встановлено, що припарковані транспортні засоби можуть знижувати пропускну спроможність ділянки дороги в 2–14 разів в залежності від кута паркування.

Проведено моделювання семи варіантів організації дорожнього руху з різними схемами паркування, що дозволило встановити кількісні залежності між розташуванням транспортних засобів та середнім часом затримки руху. Визначено, що запропонований варіант паркування під кутом 0° скорочує затримку руху одного транспортного засобу у 3,6 рази, тоді як повна заборона паркування дозволяє зменшити час затримки у 5,6 рази. Усі інші варіанти розташування транспортних засобів вздовж ділянки є недоцільними через значне зниження пропускну спроможності.

Запропоновано рекомендації щодо оптимізації паркувальної політики, зокрема впровадження інтелектуальних систем управління паркуванням, зонування паркувального простору та облаштування виділених смуг для громадського транспорту. Отримані результати можуть бути використані для покращення транспортної ситуації у містах шляхом вдосконалення організації руху та паркування.

Ключові слова: вулично-дорожня мережа, паркування, зупиночний пункт, транспортний засіб, пропускну спроможність, затримка руху, ефективність, організація дорожнього руху, моделювання.

ВСТУП

Перевантаженість проїзної частини значно знижує її пропускну спроможність (ПС). Коли кількість транспортних засобів (ТЗ) на дорозі перевищує допустимий рівень, середня швидкість руху падає, зростає кількість зупинок і гальмувань, що зрештою призводить до утворення заторів. Дорога втрачає здатність ефективно обслуговувати потік транспорту, а ризик дорожньо-транспортних пригод (ДТП) збільшується, що ще більше ускладнює ситуацію.

Окрему проблему створюють припарковані автомобілі. Вони звужують проїзну частину, утворюючи своєрідні «пляшкові горлечка», що ускладнюють маневрування інших учасників руху. Водії змушені здійснювати додаткові перестроювання, витратити час на об'їзд, що не лише знижує швидкість потоку, а й підвищує ймовірність конфліктних ситуацій.

Крім хаотичного паркування, на ПС впливають зупинки громадського транспорту, пішохідні переходи, перехрестя та інші об'єкти інфраструктури. Проте саме припарковані ТЗ часто стають основним чинником заторів у містах.

Затримки, що виникають через затори, світлофори чи дорожні роботи, збільшують час, необхідний для подолання певної ділянки дороги. Чим більше таких затримок, тим менше автомобілів може проїхати цією дорогою за одиницю часу. Таким чином, хаотичне паркування не лише обмежує рух, а й суттєво знижує ефективність використання міських транспортних артерій. Саме тому дослідження впливу паркування на організацію дорожнього руху (ОДР) є надзвичайно актуальним для транспортного планування.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ефективність дорожнього руху відображає якість роботи транспортної системи на певній ділянці чи в межах міста. Вона визначається такими показниками, як час подолання маршруту, середня швидкість, щільність трафіку, інтенсивність руху, частота зупинок, час затримки, витрати пального та безпека. Аналіз цих параметрів дозволяє виявляти проблемні зони та знаходити шляхи покращення руху. Одним із ключових показників є ПС, яка показує, наскільки ефективно дорога може обслуговувати потік транспорту, особливо у години пік. Вона залежить від максимальної інтенсивності руху, щільності потоку, середньої швидкості, часу затримки, рівня сервісу та коефіцієнта використання смуги руху. Врахування цих факторів є основою для ефективного планування й проектування доріг.

Кожен з цих показників дає можливість оцінити, наскільки ефективно використовується дорога і які можуть бути причини зниження її ПС. Як вже зазначалось, на ПС проїзної частини впливає низка факторів: ширина проїзної частини [2]; кількість смуг руху [3]; стан дорожнього покриття; світлофорне регулювання [4]; інтенсивність і структура трафіку (велика кількість ТЗ, особливо вантажівок або автобусів, може зменшити швидкість потоку і, відповідно, ПС); зупинки громадського транспорту [5]; наявність припаркованих автомобілів [6]; погодні умови; інфраструктурні обмеження (мости, тунелі, перехрестя та інші елементи дорожньої інфраструктури можуть обмежувати кількість транспорту, що проходить через них) тощо [7]. Ці фактори разом визначають, наскільки ефективно і швидко ТП може пересуватися по дорозі.

Зупинки громадського транспорту можуть значно впливати на ПС проїзної частини. Під час зупинки автобусів чи тролейбусів на проїзній частині інші ТЗ змушені знижувати швидкість або зупинятися, що створює затримки та зменшує загальну швидкість руху. Це особливо помітно на вузьких дорогах або в умовах інтенсивного трафіку. Крім того, часті зупинки призводять до збільшення числа гальмувань і прискорень, що також негативно позначається на ПС дороги [8]. Пішохідні переходи суттєво впливають на ПС дороги, оскільки змушують ТЗ уповільнювати рух або зупинятися, що збільшує час затримки та знижує середню швидкість потоку. Неконтрольовані або погано організовані переходи особливо порушують ритм руху, зменшуючи ефективність використання дороги. Щоб уникнути заторів і перерозподілу ТП на альтернативні маршрути, важливо правильно планувати переходи. Світлофори та інші засоби регулювання мають бути налаштовані так, щоб мінімізувати зупинки та підтримувати безперервність руху. Крім того, на швидкісних дорогах переходи можуть підвищувати ризик ДТП, що також впливає на ПС через затримки, пов'язані з ліквідацією наслідків аварій. Тому грамотна організація пішохідного руху є ключовою для збереження ефективності транспортної мережі. Засоби заспокоєння руху ("traffic calming measures") спрямовані на зниження швидкості та підвищення безпеки, особливо в житлових районах і біля шкіл. Вони впливають на ПС, сповільнюючи ТП, збільшуючи затримки та перерозподіляючи рух. Водночас, покращення умов для пішоходів і велосипедистів, зміна поведінки водіїв і загальне підвищення безпеки можуть у довгостроковій перспективі позитивно позначитися на ефективності дорожньої мережі [9]. Дорожні знаки також суттєво регулюють ГС. Обмеження швидкості зменшує аварійність, а пріоритетні й заборонні знаки впорядковують рух, знижуючи кількість конфліктних точок. Світлофорні регулюють потік, скорочуючи затримки, а направляючі та знаки розподілу смуг сприяють рівномірному використанню проїзної частини. Окрему роль відіграють перехрестя та примикання, оскільки саме тут ТП зливаються і розходяться, створюючи зони сповільнення та зупинок. Тому при аналізі факторів, що впливають на ПС, необхідно враховувати також ефективність роботи цих вузлових точок дорожньої мережі [10].

Всі перелічені фактори впливають на ПС в тому чи іншому ступені. Наявність пішохідних переходів, зупинок громадського транспорту, дорожніх знаків, перехресть тощо є звичайною необхідністю для безпечного та ефективного дорожнього руху усіма його учасниками. Єдине, на що ми точно можемо вплинути, так на якісну організацію паркування. Тому наступним кроком і основою даного дослідження буде вивчення питання вуличного паркування ТЗ.

Попри війну, рівень автомобілізації в Україні зростає, загострюючи проблему паркування, особливо вуличного. Неправильно припарковані ТЗ паралізують рух, перешкоджають екстреним службам і затримують громадський транспорт. Ситуація хаотична, а виділення територій під паркування стає вкрай актуальним. На відміну від міст Західної Європи та Північної Америки, що відмовилися від вуличного паркування на користь багаторівневих стоянок, в Україні такого балансу поки не досягнуто. Дефіцит паркувальних місць у великих містах і слабкий контроль змушують водіїв залишати власні ТЗ вздовж доріг, зменшуючи їхню ефективну ширину. Це спричиняє затори, зниження швидкості руху, зростання ДТП та додаткові екологічні й економічні проблеми. Найгостріше питання стоїть у центрах міст через вузькі вулиці та високі ТП, хоча й периферійні райони не позбавлені труднощів. Вирішити проблему можливо лише за рахунок грамотного використання міського простору, створення позавуличних паркінгів та оптимізації внутрішніх вуличних стоянок. У цьому дослідженні аналізуються закономірності змінення ПС проїзної частини залежно від способу паркування.

Проблеми вуличного паркування в Україні спричинені недотриманням ПДР та нестачею місць. Оновлені правила забороняють облаштування стоянок на тротуарах і вузьких вулицях, зобов'язуючи враховувати інтенсивність руху [11]. Водночас міста не можуть забезпечити достатньо паркомісць без шкоди для ПС доріг. Обмеження в'їзду, зонування, підвищення штрафів і розвиток паркінгів

можуть зменшити проблему паркування, але водночас завдати економічних збитків бізнесу та учасникам руху. Головним завданням є стимулювання використання громадського транспорту в центрі міста, що потребує його докорінного реформування. В Україні система паркування розвивається хаотично: переважають відкриті стоянки, а нестача місць загострює ситуацію. Будівництво багаторівневих і підземних паркінгів – складне, дороге, але неминуче рішення для майбутнього [12].

Отже, на цьому етапі залишається розмішувати ТЗ на ВДМ міста. В Україні вуличне паркування залишається поширеним з кількох причин. По-перше, обмежений простір для будівництва паркінгів у багатьох містах, особливо в історичних центрах, ускладнює створення нових паркувальних майданчиків через щільну забудову та відсутність вільних територій. По-друге, висока вартість будівництва багаторівневих або підземних стоянок робить їх нерентабельними без підтримки з боку держави чи міста. Додатково ситуацію ускладнює невідповідність урбаністики: у багатьох містах України відсутня чітка стратегія управління міським простором, що спричиняє хаотичне розміщення паркувальних місць без належного планування. Також значним чинником є відсутність альтернатив, адже недостатньо розвинена інфраструктура громадського транспорту, особливо у малих містах та передмістях, змушує людей користуватися власними автомобілями, підтримуючи високий попит на паркувальні місця. Вагому роль відіграють і звички водіїв, які часто віддають перевагу паркуванню "під дверима" свого будинку, офісу чи магазину, вважаючи його найбільш зручним і доступним варіантом. Окрім цього, у багатьох містах відсутній ефективний контроль за дотриманням правил паркування, що дозволяє водіям залишати автомобілі на вулицях без особливих обмежень, посилюючи проблему впорядкування паркувального простору. Через ці фактори вуличне паркування залишається необхідністю, хоча воно і спричиняє проблеми з ПС доріг та безпекою руху. Тобто розміщення ТЗ на ВДМ міста повинно бути раціональним, ефективним і, безумовно, безпечним.

Проблемі вуличного паркування присвячено безліч наукових досліджень як в Україні, так і за кордоном, що підкреслює її значущість у сфері транспортного планування. Однак вплив припаркованих ТЗ на ефективність проїзду окремих ділянок ВДМ залишається актуальним питанням, оскільки паркування не лише зменшує ПС доріг, але й впливає на швидкість, маневреність і безпеку руху. Саме тому дослідження, присвячене оцінці ефективності проїзду з урахуванням цього фактору, має практичну цінність і може сприяти розробці оптимальних рішень для підвищення якості транспортного обслуговування міста.

Статті [13]–[20] присвячені оцінці впливу облаштування паркувальних місць на проїжджій частині на ПС ВДМ у різних міських умовах. У статтях [13] та [14] досліджено вплив паркування у крайній правій смузі м. Дніпро та м. Дебре-Маркус (Ефіопія) за допомогою натурних обстежень та імітаційного моделювання. Виявлено значне зменшення місткості доріг (до 49,9%) та збільшення часу поїздки через легальне та нелегальне паркування. Обидві роботи є цінними для аналізу змін ефективності руху внаслідок паркування, проте не враховують вплив різних схем паркування та їхній вплив на затримки ТЗ. Стаття [15] аналізує позитивні та негативні наслідки паркування, підкреслюючи необхідність його регулювання. Рекомендовано обмежувати паркування на магістральних дорогах, але дозволяти його на другорядних вулицях, переважно у форматі паралельного паркування. У статті [16] досліджено вплив паркування поблизу сигналізованих перехресть у країнах із неоднорідним дорожнім рухом, таких як Індія. Встановлено, що якщо відстань першого припаркованого автомобіля від стоп-лінії перевищує 65 м, його вплив на насичений потік (SF) зникає, що узгоджується з рекомендаціями Indo-HCM. Стаття [17] аналізує вплив регулювання паркування у змішаному трафіку із підключеними та автономними ТЗ (CAVs) на прикладі м. Лестер (Великобританія). Виявлено, що заміна паркувальних місць на смуги руху, велодоріжки або громадські простори може суттєво зменшити затримки (до 47%), викиди (понад 90%) та ДТП (94%). Однак організація станцій висадки/посадки пасажирів може збільшувати затримки. У статті [18] розглянуто просторовий розподіл тривалості вуличного паркування (OPD) у м. Сіань (Китай) за допомогою методу багатомасштабної географічно зваженої регресії (MGWR). Встановлено, що OPD залежить від кількості паркувальних подій, наявності офісних будівель, розташування стоянки та відстані до зупинок громадського транспорту. Знижений рівень плати за паркування сприяє збільшенню OPD у будні дні. Стаття [19] аналізує вплив тривалості вуличного паркування на середню швидкість руху та затримки ТП у центральній частині м. Львів. Встановлено, що найменші затримки спостерігаються при тривалості паркування 900–1800 с, а найнижча швидкість (14,75 км/год) фіксується при 300-секундному паркуванні через часті сповільнення. У

статті [20] розглядається вплив вуличного паркування на ПС дороги у комерційній зоні м. Джембер (Індонезія). Виявлено, що неправильне використання паркувальних місць негативно впливає на ПС дороги. Аналіз показує сильний взаємозв'язок між використанням паркувальних місць і продуктивністю дороги (коефіцієнт кореляції 0,8–1,0).

Ще ряд робіт присвячено впливу придорожного паркування на параметри дорожнього руху в різних містах світу. Стаття [21] аналізує проблему дорожнього руху в індійських містах, зокрема в м. Сілчарі, через зростаючу кількість транспорту та обмежену інфраструктуру. Основна увага приділяється змішаному трафіку, нестачі дорожнього простору та впливу стихійного паркування на ПС доріг. Дослідження є важливим для розуміння критичних факторів, що впливають на ТП, однак воно лише описує проблему без детального аналізу можливих рішень чи стратегій її подолання. Автори статті [22] досліджують вплив придорожного паркування на дорожній рух, зокрема, як воно зменшує ефективну ширину смуг, знижує ПС та викликає затримки через в'їзди/виїзди ТЗ. Використовуючи мікросимуляційне моделювання PTV VISSIM, автори аналізують рух на дорозі A3-Colombo Negombo (Шрі-Ланка) та виявляють, що при 250 маневрах паркування на годину ПС знижується приблизно на 17%. Перевагою дослідження є використання сучасних методів моделювання для точного аналізу ТП, проте воно зосереджується лише на конкретній дорозі без розгляду ширшого контексту міського планування або стратегій мінімізації негативного впливу. У статті [23] аналізується проблема придорожного паркування в місті Аль-Неджеф (Ірак), зосереджуючись на двох перевантажених районах — Аль-Раван і Аль-Іскан. Використовуючи дані з дронів, відеокамер та ручних підрахунків, дослідження виявило, що пік завантаженості паркування припадає на вечірній час після 16:00. Більшість автомобілів (понад 80%) займають місця щонайменше на 30 хвилин, що сприяє затримкам і заторам. Виявлено поширену проблему незаконного паркування як у будні, так і у вихідні дні. Основна рекомендація — регулювання придорожного паркування та впровадження позавуличних стоянок. Перевагою дослідження є використання різних методів збору даних для об'єктивної оцінки проблеми, тоді як недоліком може бути відсутність детального аналізу можливих методів контролю та реалізації запропонованих заходів. У статті [24] аналізується вплив придорожного паркування на ПС та затори в містах, зокрема на прикладі м. Сідней (Австралія). Дослідження виявляє, що короткотривалі паркувальні зони більше зменшують ПС суміжних смуг, оскільки часті маневри в'їзду/виїзду спричиняють додаткові затримки та черги. Використовуючи польові дослідження та статистичний аналіз, автори формують коригувальні коефіцієнти, які можуть бути застосовані в транспортному плануванні для точнішого розрахунку ПС доріг із придорожнім паркуванням. Основна мета дослідження — покращити методи оцінки впливу транспортної інфраструктури та запропонувати ефективні стратегії зменшення заторів у містах. У статті [25] досліджується вплив придорожного паркування на ТП в центральному бізнес-районі м. Багдада (Ірак). Автори вказують, що хаотичне паркування призводить до зменшення ефективної ширини смуг, створює затори, конфлікти між припаркованими та рухомими автомобілями, а також провокує «круїзинг» у пошуках місця для стоянки. Дослідження базується на польових спостереженнях та моделюванні в PTV VISSIM. Видалення придорожного паркування показало значне покращення дорожнього руху: збільшення транспортного потоку на 46,6%, скорочення часу подорожі на 38%, зменшення затримок транспорту на 69%, а також суттєве скорочення довжини черг та кількості зупинок. Отримані результати підкреслюють важливість регулювання придорожного паркування для покращення міської мобільності та зменшення заторів.

Таким чином, усі розглянуті роботи роблять значний внесок у розуміння впливу придорожного паркування на ТП та ПС ВДМ. Водночас спільним обмеженням є те, що більшість досліджень зосереджується на конкретних міських ділянках або дорогах без комплексного аналізу міської мобільності загалом. Крім того, відсутність детального розгляду різних схем паркування та їхнього впливу на затримки ТЗ підкреслює необхідність подальших досліджень для розробки ефективних стратегій управління паркуванням у міських умовах.

При цьому не всі дослідження обмежуються проблемами паркування. Деякі роботи наголошують на важливості зміни транспортних пріоритетів, зокрема розвитку громадського транспорту, велоінфраструктури та пішохідних зон як способу оптимізації міського простору. Такий підхід дозволяє не лише зменшити потребу в паркувальних місцях, а й покращити загальну якість міського середовища [26].

Отже, проблема впливу припаркованих автомобілів на ТП є актуальною для багатьох міст світу. Дослідження з цього питання охоплюють різні країни та континенти, що підтверджує його глобальну значущість. У країнах, що розвиваються, таких як Індія, Ірак та інші держави Азії та

Близького Сходу, питання організації придорожного паркування є одним із головних факторів міських заторів. Дослідження, проведені у цих регіонах, демонструють, що неконтрольоване паркування суттєво зменшує ефективну ширину проїжджої частини, знижує ПС і створює додаткові затримки. Водночас у розвинених країнах, таких як США та більшість країн Європи, ця проблема вже значною мірою вирішена. Широке впровадження підземних і багатоповерхових паркінгів, а також регульованих парковок за допомогою цифрових технологій значно знизило негативний вплив придорожного паркування. Крім того, сучасні концепції міського планування передбачають створення громадських просторів, велодоріжок та альтернативних транспортних рішень, що значно зменшують потребу в паркуванні вздовж вулиць. Зважаючи на широку географію даної проблеми, досвід різних країн може бути корисним для аналізу ситуації в Україні. В умовах периферійних районів м. Харків вплив припаркованих автомобілів на ТП залишається актуальним, що вимагає детального дослідження та пошуку ефективних рішень, зважаючи як на міжнародний досвід, так і на локальні особливості дорожньої мережі міста.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є підвищення ефективності проїзду ділянки ВДМ міста шляхом впорядкування паркування ТЗ на проїзній частині, зокрема через аналіз впливу різних факторів на транспортні затримки та їх кількісне оцінювання, що сприятиме розробці ефективних рішень для оптимізації міського руху. Результати дослідження повинні доповнити світову практику та дозволити адаптувати сучасні підходи до українських реалій. Отримані результати можуть бути корисними як для міського планування на локальному рівні, так і для загальних транспортних досліджень у країнах із подібними умовами, сприяючи розробці ефективних рішень для оптимізації руху та зменшення затримок.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження різних факторів на ефективність проїзду ділянки проїзної частини нами обрана ділянка ВДМ Індустріального району м. Харків. Ділянка, розташована вздовж просп. Олександрівського від вул. 12 Квітня до просп. Індустріального, має загальну довжину 555 м і ширину 18 м, з трьома смугами руху по 3 м в кожному напрямку (див. рис. 1).

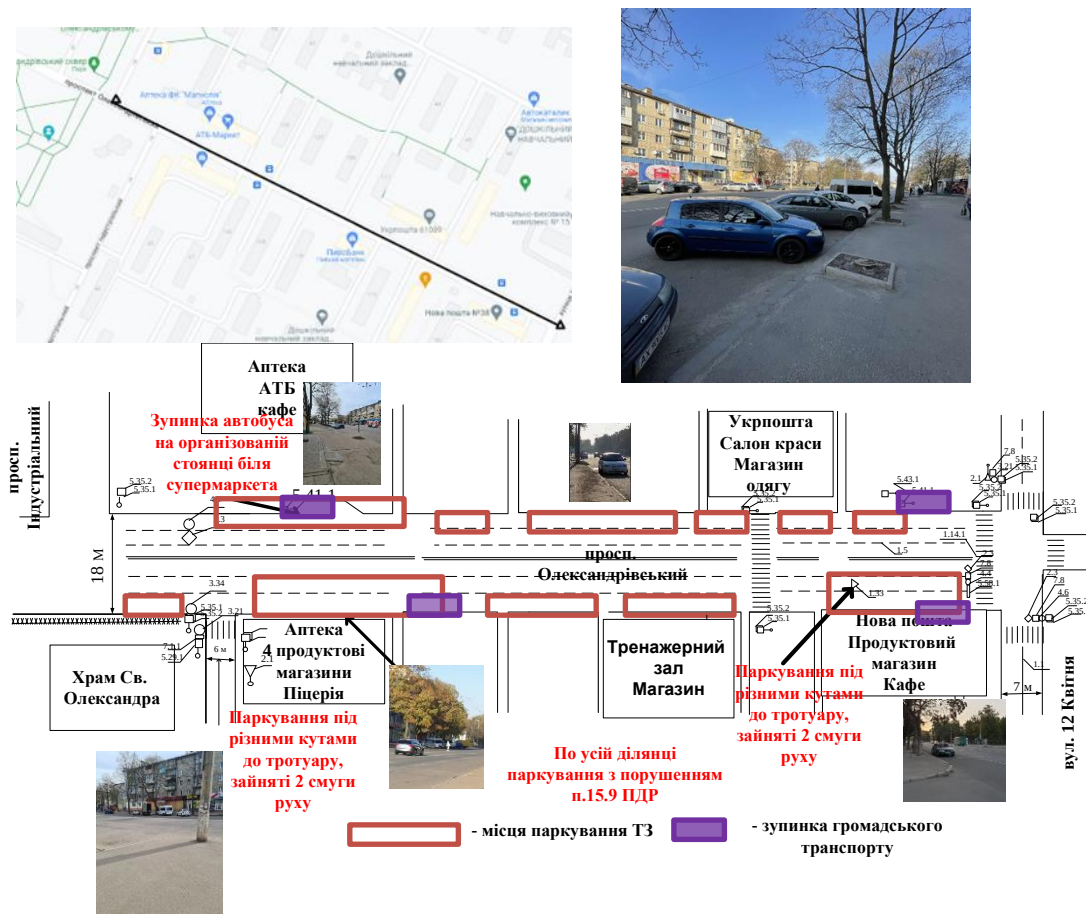


Рисунок 1 - Існуюча схема ділянки з характеристикою дорожніх умов

Досліджувана територія характеризується низкою проблем, пов'язаних із ОДР, що зумовлюють виникнення конфліктних ситуацій між учасниками руху. Однією з ключових проблем є відсутність пішохідного переходу поблизу супермаркету АТБ, що спричиняє хаотичне перетинання проїжджої частини пішоходами у невизначених для цього місцях. Це створює підвищену небезпеку як для пішоходів, так і для водіїв, які змушені екстрено реагувати на раптову появу людей на дорозі. Ще одним проблемним аспектом є невідале розташування знака 5.45.1 «Пункт зупинки автобуса», який знаходиться безпосередньо на парковці супермаркету, що ускладнює рух громадського транспорту та створює додаткові перешкоди для пасажирів під час посадки та висадки. Окрім цього, хаотичне паркування ТЗ уздовж проїжджої частини, зокрема з порушенням вимог ПДР, суттєво знижує ПС дороги, обмежує оглядовість та підвищує ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Додатковим чинником є щільна житлова забудова, яка генерує значні пішохідні потоки через проїжджу частину, що ще більше ускладнює дорожню ситуацію. Аналіз офіційних даних Патрульної поліції свідчить, що ця ділянка не належить до найнебезпечніших з точки зору кількості зареєстрованих ДТП. Проте на практиці тут регулярно виникають потенційно небезпечні ситуації, основними причинами яких є: перехід пішоходами дороги у невизначених місцях, що підвищує ризик зіткнень; раптова поява пішоходів на нерегульованих переходах, що ускладнює вчасну реакцію водіїв; порушення водіями правил проїзду пішохідних переходів, зокрема ненадання пріоритету пішоходам; ігнорування вимог дорожніх знаків та порушення швидкісного режиму, що суттєво збільшує ймовірність ДТП. Окремо слід зазначити вплив порушень правил паркування на безпеку руху. Зокрема, паркування під кутом 60–75° призводить до значного обмеження видимості, особливо якщо серед припаркованих ТЗ є мікроавтобуси або великогабаритні автомобілі. Це створює додаткові перешкоди для водіїв, які здійснюють маневрування, а також для пішоходів, що переходять дорогу.

Таким чином, більшість проблем на цій ділянці пов'язані із систематичними порушеннями ПДР з боку як водіїв, так і пішоходів, а також із недоліками дорожньої інфраструктури. Відсутність належних умов для безпечного руху, недостатня видимість та хаотичне паркування є ключовими факторами, що зумовлюють високий рівень конфліктності ТП. Припарковані на крайній смузі ТЗ обмежують видимість і змушують водіїв маневрувати, підвищуючи ризик ДТП. Зі зростанням інтенсивності руху та рівня автомобілізації дефіцит паркомісць змушує водіїв порушувати норми, що спричиняє додаткові конфліктні ситуації. Усунення виявлених проблем потребує комплексного підходу, включно із розробкою заходів щодо впорядкування паркування, оптимізації розташування зупинок громадського транспорту та вдосконалення пішохідної інфраструктури.

У роботі [12] в запропонованій методиці визначені параметри, що впливають на максимальну кількість автомобілів, які можуть бути припарковані на проїзній частині. Проте, нами запропоновано додати ще кілька факторів, таких як зупинки громадського транспорту та пішохідні переходи. Таким чином, максимальна кількість автомобілів у випадку, коли паркування дозволено з обох сторін дороги, розраховується за такою формулою

$$N_{2\text{боки}}^{\max} = \left(2L_{\text{діл}} - \sum_{i=1}^m B - (20 + b_{\text{пр}}) \cdot n - 40 - \sum_{j=1}^k (60 + l_{\text{знк}}) - (20 + b_{\text{пш}}) \cdot f \right) / l_{\text{т}}, \quad (1)$$

де $L_{\text{діл}}$ - довжина i -тої ділянки, м; B - половини ширин проїзних частин доріг, які перетинають обрану ділянку з обох боків, м; m - кількість проїзних частин дороги, які перетинають досліджувану ділянку (вочевидь, це одна чи дві), од.; n - кількість виїздів та вїздів, що приєднуються до проїзної частини, од.; ширина кожного приєднання, метри; $b_{\text{пр}}$ - ширина кожного приєднання, м; 20 - постійна величина, яка враховує заборону паркування на відстані 10 м від вїздів, примикань та пішохідних переходів, м; f - кількість пішохідних переходів, од.; $b_{\text{пш}}$ - ширина пішохідного переходу, м; 40 - постійна величина, що враховує заборону паркування на відстані 10 м від перехресть, м; k - кількість зупинок громадського транспорту, од.; $l_{\text{знк}}$ - ширина кожної окремої зупинки, м; 60 - постійна величина, яка враховує заборону паркування на відстані 30 м від зупинок громадського транспорту, м; $l_{\text{т}}$ - довжина тротуару, необхідна для паркування одного автомобіля, метри (визначається в залежності від обраного способу паркування). До речі, за методикою в [12] розрахована довжина фронту тротуару на основі умовно обраного легкового автомобіля класу D, який найбільш розповсюджений в ТП на ВДМ міста (див. рис. 2).

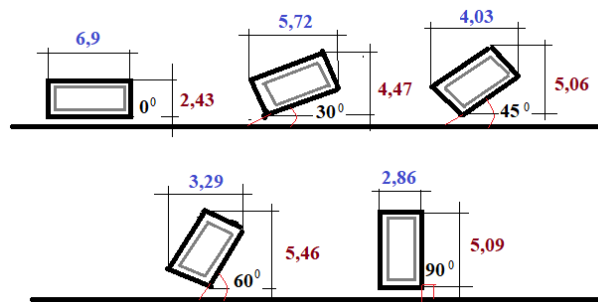


Рисунок 2 - Схеми паркування ТЗ під різними кутами до тротуару

Як уже згадувалося, для збільшення місткості вуличних парковок ТЗ розміщують не лише вздовж тротуару, але й під різними кутами до бордюру (частково або повністю на тротуарі). Найбільшу кількість ТЗ можна розмістити при поперечному паркуванні, проте для цього потрібна широка проїзна частина. Водночас, маневр виїзду автомобіля при поперечному розташуванні створює перешкоди для руху іншого транспорту. Найбільш раціональним варіантом є паркування ТЗ під кутом до тротуару відповідно до напрямку руху. Такий спосіб дозволяє автомобілям, які виїжджають зі стоянки, плавно вливатися в загальний потік транспорту без створення значних перешкод. Заїзд на парковку може бути здійснений як переднім, так і заднім ходом. Крім того, паркування під кутом до тротуару не тільки збільшує кількість місць для стоянки, але й значно скорочує час на маневрування — від 10 до 12 с, у порівнянні з паралельним паркуванням, при якому час на маневрування може збільшуватися до 30 с.

Аналіз літературних джерел виявив низку переваг паркування безпосередньо на проїжджій частині. Серед основних плюсів можна виділити можливість водію зупинити автомобіль близько до точки призначення, що значно полегшує доступ до важливих об'єктів. Це також дозволяє економити час на поїздки, оскільки не потрібно шукати місце для паркування далеко від цільового пункту. Крім того, зникає потреба в додаткових маневрах для заїзду на спеціальні паркувальні майданчики поза вулицею, а для маневрування використовується проїжджа частина, що забезпечує більш ефективне використання міського простору.

Однак ці переваги затьмарюються значними недоліками. Паркування на проїжджій частині створює аварійні ситуації на дорозі, оскільки знижується загальна безпека руху та швидкість ТП. Це також призводить до зниження ПС ВДМ та зменшення інтенсивності руху. Окрім цього, виникають перешкоди для роботи міського пасажирського транспорту, оскільки зменшується ширина проїжджої частини. Усі ці недоліки чітко проявляються на досліджуваній нами ділянці дороги, де проблема паркування значно впливає на ОДР та загальну безпеку.

Для полегшення розрахунків за формулою (1) нами зображена схема (див. рис. 3), на якій зображені відрізки ділянки, де дозволяється паркування згідно ПДР.

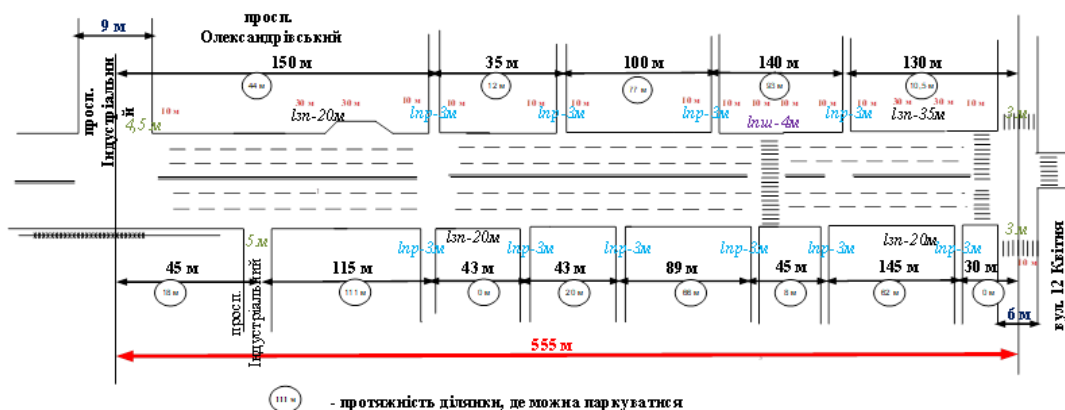


Рисунок 3 – Розрахунок довжини перегону, де паркування дозволено

В таблиці 1 наведена максимальна кількість ТЗ, які можуть бути розташовані при можливих кутах паркування. Варто зазначити, що ширина паркувальної смуги визначена шляхом віднімання корисної ширини проїзної частини від її фактичної ширини. Вважається, що для проїзду ТЗ достатньо

однієї смуги шириною 3 м для вулиць загальноміського та районного значення, відповідно до ДБН В.2.3-5: 2018 "Вулиці та дороги населених пунктів". На рисунку 4 продемонстровано, скільки ТЗ і яким способом можуть бути припарковані на всій протяжності досліджуваної ділянки.

Таблиця 1 - Результати розрахунку максимальної кількості ТЗ, яка може бути припаркована

Напрямок руху	Ширина проїзної частини, м	Ширина смуги паркування, м	Довжина перегону, м	Довжина перегону, дозволена для паркування, м	Максимальна кількість автомобілів, що може бути припарковано під кутом, од				
					0°	30°	45°	60°	90°
в бік просп. Індустріальний	9	6	555	236,5	34	41	58	71	82
в бік вул. 12 Квітня	9	6	555	285	41	49	70	86	99
Разом					75	90	128	157	181

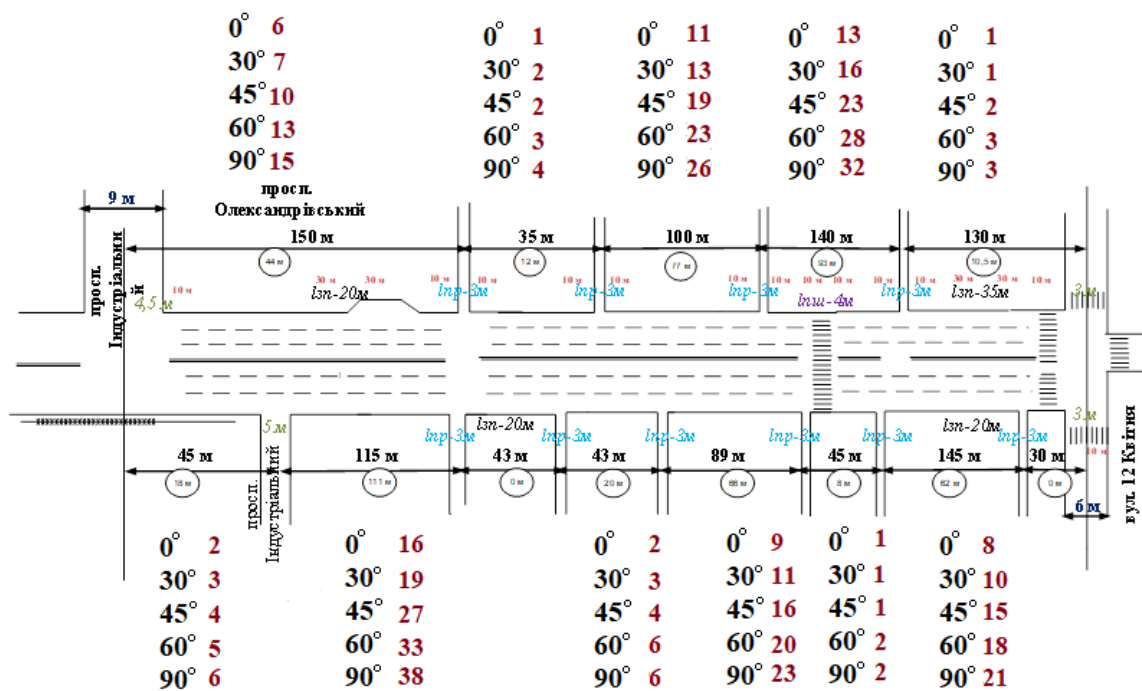


Рисунок 4 – Кількість ТЗ, які можна розмістити в залежності від кута паркування

Для оцінки впливу паркування на ПС нами була використана методика в [27], за якою встановлено, що паркування ТЗ може знижувати ПС ділянки дороги в 2-14 разів (див. табл. 2).

Таблиця 2 – Результати розрахунку ПС в залежності від кута паркування

Спосіб паркування	"паркування заборонено"	0°	30°	45°	60°	90°
ПС	5693	2846	1366	702	531	398

Найефективнішим способом паркування є паралельне розташування ТЗ уздовж тротуару, оскільки воно мінімізує займаний простір і забезпечує безпеку руху. Паркування під кутом, хоча й підвищує місткість, має значні недоліки: обмежену оглядовість при виїзді, зайву витрату дорожнього простору та негативний вплив на пішоходів. Оптимізація паркувальних схем потребує врахування параметрів ВДМ, інтенсивності руху та функціонального зонування міста. Система паркування формується під впливом рівня автомобілізації, транспортної доступності, містобудівних факторів та екологічно-економічних умов. Грамотне планування дозволяє збалансувати потреби транспорту й міського середовища, підвищуючи ефективність використання вуличного простору.

Експериментальні дослідження показників функціонування ділянки дороги проведені за допомогою програмного забезпечення PTV VISSIM. Для порівняння промодельовані сім варіантів ОДР на цій ділянці (див. рис. 5): варіант 1 — існуюча ситуація з хаотичним паркуванням ТЗ з обох боків із порушенням правил паркування (в бік вул. 12 Квітня залишається 1 смуга для руху, в бік просп. Індустріальний — 2); варіант 2 — запропоновано паркування паралельно до тротуару з дотриманням ПДР (для руху ТЗ залишаються 2 смуги руху в обох напрямках ділянки); варіант 3 — запропоновано паркування під кутом 300 до тротуару з дотриманням ПДР (для руху ТЗ залишається 1 смуга руху в кожному напрямку шириною 4,53 м); варіант 4 — запропоновано паркування під кутом 450 до тротуару з дотриманням ПДР (для руху ТЗ залишається 1 смуга руху в кожному напрямку шириною 3,94 м); варіант 5 — запропоновано паркування під кутом 600 до тротуару з дотриманням ПДР (для руху ТЗ залишається 1 смуга руху в кожному напрямку шириною 3,54 м); варіант 6 — запропоновано паркування під кутом 900 до тротуару з дотриманням ПДР (для руху ТЗ залишається 1 смуга руху в кожному напрямку шириною 3,91 м); варіант 7 - повна заборона паркування на ділянці. Моделі враховують рух пішоходів через наземні пішохідні переходи (ТЗ пропускають пішохідні потоки) та рух громадського транспорту по маршрутах (їх виїзд та заїзд із зупинок).



Рисунок 5 – Моделювання дорожнього руху на ділянці при різних сценаріях дорожніх умов

Перед тим як розпочати моделювання нами розглянуто ще варіанти моделей (див. рис. 6) з метою визначення впливу кількості зупинок громадського транспорту на середню затримку руху

одного ТЗ на досліджуваній ділянці. При цьому ділянка має по три смуги руху в кожному напрямку, перешкоди з боку інших факторів (паркування, пішохідні переходи тощо) відсутні.

Так само нами був визначений вплив кількості ТЗ, які працюють на маршруті, на середній час затримки ТЗ на ділянці (див. рис. 7). Кількість маршрутних ТЗ (автобусів, тролейбусів) має значний вплив на затримки руху основного ТП. Це відбувається через частіші зупинки, оскільки зі збільшенням

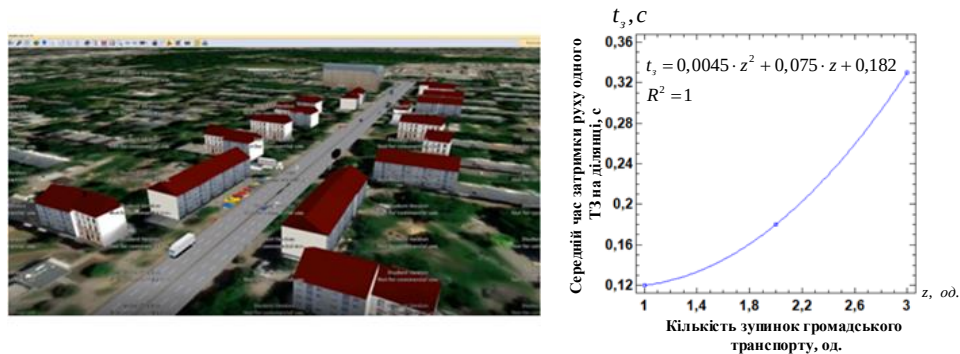


Рисунок 6 - Залежність часу затримки руху ТЗ на ділянці від кількості зупиночних пунктів

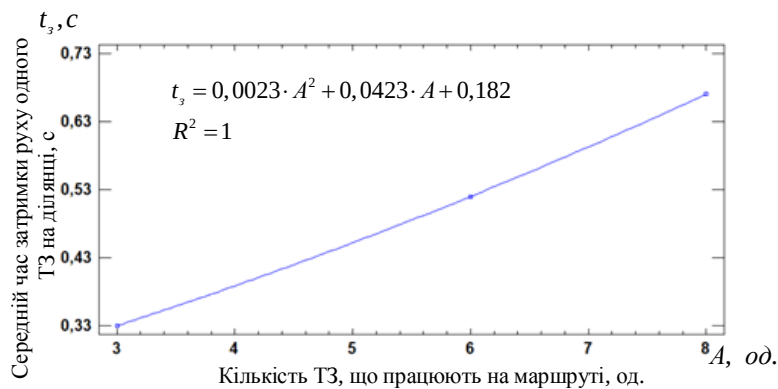


Рисунок 7 – Залежність часу затримки руху ТЗ по ділянці від наявної кількості ТЗ на маршруті

кількості маршрутних ТЗ на ділянці дороги частішає кількість зупинок. Громадський транспорт зупиняється для посадки і висадки пасажирів, що змушує інші автомобілі знижувати швидкість або чекати, особливо на дорогах без окремих смуг для громадського транспорту. Під час війни в Україні ситуація з громадським транспортом на обраній ділянці суттєво змінилася (скоротилася кількість маршрутів), і це обов'язково потрібно враховувати при аналізі ТП та затримок.

Після проведення моделювання з різними схемами паркування проведено аналіз критеріїв функціонування, а саме середнього часу затримки руху одного ТЗ (див. табл. 3).

Таблиця 3 – Результати моделювання

Варіант ОДР	Середній час затримки руху ТЗ, с
1	5,96
2	1,65
3	5,72
4	5,72
5	5,87
6	5,72
7	1,05

Як можна бачити з розрахунку, запропонований варіант паркування під кутом 0° , скорочує затримку руху одного ТЗ в 3,6 рази. Повна заборона паркування скорочує час затримки в 5,6 рази. Усі інші варіанти розташування ТЗ вздовж ділянки є недоцільними.

Нами також побудована залежність ПС ділянки від середнього часу затримки одного ТЗ (див. рис. 8) та середнього часу затримки одного ТЗ від корисної ширини проїзної частини (див. рис. 9).

Після визначення кількості автомобілів, які не можуть паркуватися на проїзній частині, необхідно здійснити детальне планування реалізації проекту стоянки. Насамперед слід провести аналіз можливих джерел фінансування та залучення інвесторів або міського бюджету. Далі потрібно розробити проектну документацію, отримати необхідні дозволи та погодження, а також підготувати тендерну документацію для вибору підрядника. Після цього можна переходити до виконання

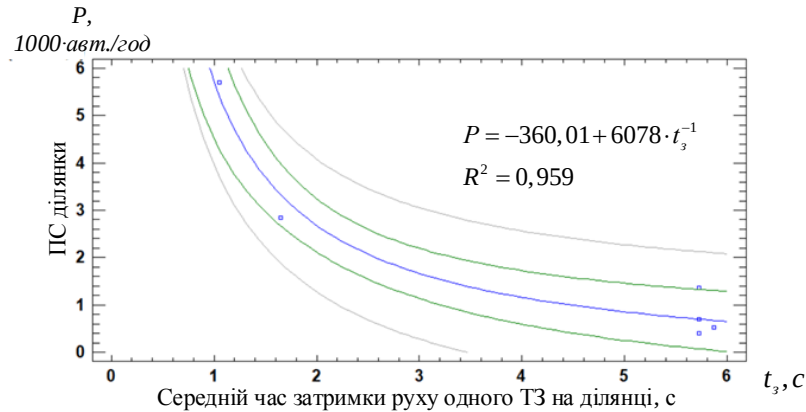


Рисунок 8 – Залежність ПС ділянки від середнього часу затримки руху одного ТЗ

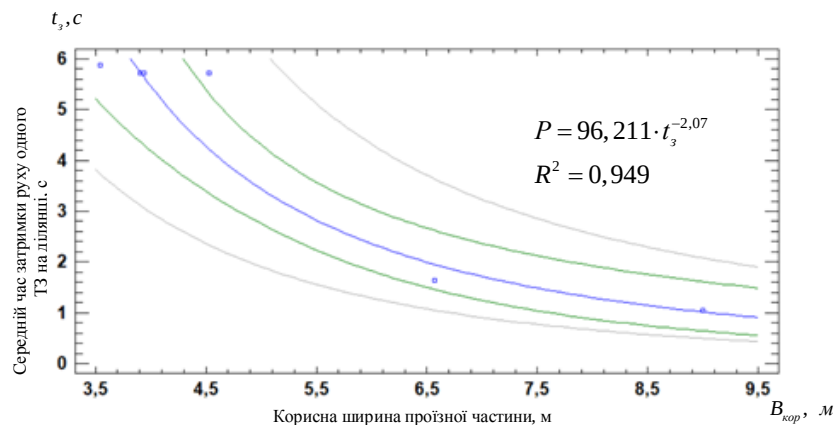


Рисунок 9 – Залежність середнього часу затримки руху одного ТЗ від корисної ширини проїзної частини

будівельних робіт, включаючи підготовку основи, асфальтування, встановлення огорожі, шлагбаумів і нанесення розмітки. Завершальним етапом буде введення стоянки в експлуатацію та впровадження заходів щодо її ефективного використання, таких як встановлення інформаційних знаків та організація контролю за дотриманням правил паркування.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В першу чергу слід зазначити, що кількість зупинок безпосередньо впливає на середній час затримки руху: чим їх більше, тим довший загальний час подорожі. Основні фактори впливу – час на зупинку та частота зупинок. Близьке розташування зупинок сповільнює рух, а під'їзд до них та зміни пасажиропотоку додають затримки. Зупиночні пункти впливають і на транзитний транспорт, змушуючи його уповільнюватися. Для зменшення негативного впливу потрібні окремі смуги та зупинки в "кишенях". Додатковим фактором є припарковані ТЗ, які звужують проїзну частину, ускладнюють маневрування та збільшують затримки. Особливо критично це біля зупинок громадського транспорту, перехресть та пішохідних переходів, де припарковані ТЗ обмежують оглядовість і сповільнюють рух. Велика кількість маршрутних ТЗ на вузьких дорогах також уповільнює потік, створюючи затримки, особливо в години пік. Часті зупинки змушують водіїв гальмувати та прискорюватися, порушуючи ритм руху. Зменшити цей вплив можна завдяки виділенню смуг, оптимізації розкладів і регулюванню паркування.

ПС ділянки обернено пропорційна до середнього часу затримки руху ТЗ. Чим довше затримка, тим менше автомобілів проїжджає через ділянку за певний час. Значні затримки через затори, часті зупинки або припарковані ТЗ можуть призвести до транспортного колапсу.

Корисна ширина проїзної частини є важливим фактором у зменшенні затримок. Збільшення ширини зменшує вплив перешкод та покращує ПС, але лише за умови ефективного управління рухом і регулювання зон паркування. Результати дослідження підтверджують значний вплив припаркованих ТЗ на ефективність проїзду. Мінімізація їхнього впливу через заборону паркування у критичних зонах, облаштування "кишень" та розширення проїзної частини сприятиме покращенню міської мобільності.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження встановлено кількісні залежності часу затримки руху ТЗ від ключових параметрів дорожнього середовища, зокрема кількості зупиночних пунктів, кількості ТЗ, працюючих на маршруті, ширини проїзної частини та ПС дороги. Отримані результати мають важливе практичне значення та можуть бути використані для підвищення ефективності транспортної системи. Зокрема, вони сприятимуть оптимізації ОДР, удосконаленню маршрутів громадського транспорту, прийняттю обґрунтованих інфраструктурних рішень, моделюванню ТП, а також розробці стратегій управління паркуванням з метою мінімізації затримок. Таким чином, дослідження робить вагомий внесок у розвиток методів управління міським транспортом, спрямованих на покращення його ПС та комфортності для учасників дорожнього руху.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Amudapuram Mohan Rao, S. Velmurugan, K.M.V.N. Lakshmi, Evaluation of Influence of Roadside Frictions on the Capacity of Roads in Delhi, India. *Transportation Research Procedia*, Volume 25, 2017, Pages 4771-4782, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.489>.
2. Robert M. Brooks. Influence of roadway width and volume to capacity ratio on PCU values. *Transport problems*. Volume 5 issue 2. 2010.
3. Zheng, J., Sun, J., & Yang, J. (2015). Relationship of Lane Width to Capacity for Urban Expressways. *Transportation Research Record*, 2483(1), 10-19. <https://doi.org/10.3141/2483-02>
4. Ніколюк, П. 2023. Вплив інтелектуального світлофорного регулювання на пропускну здатність міського перехрестя. *Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science*. 1 (Груд 2023), 37-51. DOI: <https://doi.org/10.31558/2786-9482.2023.1.3>.
5. Mushule, N. K. (2012). Bus Bay Performance and its Influence on the Capacity of Road Network in Dar Es Salaam. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), 107-113. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2012.107.113>
6. Пашкевич С.М., Никончук В.М., Кристопчук М.Є. Оцінка пропускну спроможності міської дорожньої мережі з урахуванням пропозиції паркування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч.І. С. 201 – 212. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.201-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.201-212)
7. Kalmamat Atabekov, Bakytbek Sarymsakov, Sergey Voinash, Irina Troyanovskaya, Adelya Sayfutdinova, Yuliya Balabanova. Expert Assessment of the Factors of the Impact of Road Capacity on the Environment. *Transportation Research Procedia*, Volume 68, 2023. Pp. 925-930. ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.129>.

- 8.Ievgen Medvediev, Sergiy Soroka. The road network traffic capacity taking into account public transport stops layout method. *TRANSPORT TECHNOLOGIES*. Vol. 1, No. 2, 2020. Pp. 13-22. <https://doi.org/10.23939/tt2020.02.013>
- 9.BUGAYOV, I., KHOLODOVA, O., BUHAIOVA, M., & KHOLODOV, O. (2024). Case study on implementing traffic calming devices: an example from the street and road network in Kharkiv . *Innovative Technologies in Transportation Engineering*, 1(1), 15-22. https://doi.org/10.36910/conf_avto.v1i1.1389
- 10.О. Б. Потійчук, Л. М. Піліпака. Транспортні розв'язки: навч. посібник. [Електронне видання]. Рівне: НУБГП, 2020. 263 с. ISBN 978-966-327-481-2
- 11.Про затвердження Правил паркування транспортних засобів. *РАДА. Верховна Рада України. Законодавство України* : веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1342-2009-%D0%BF#Text> (дата звернення: 25.09.2024).
- 12.Холодова О.О. Формування систем паркінгів в центральних ділових частинах великих та найбільших міст: дис.... к-та техн. наук: 05.22.01/ Харківський нац. автомоб.-дорожній ун-т. Харків, 2013. 228 с.
- 13.ЛИТВИН В., ТАРАН І. (2020). Кількісна оцінка впливу облаштування паркувальних місць у крайній правій смугі на ефективність дорожнього руху. *СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ*, 2(15), 41-53. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.391>
- 14.Geremew, G. Modeling and analyzing the impact of on-street parking on traffic flow: a study of the main highway in Debre Markos Town, Ethiopia. *Transportation* (2024). <https://doi.org/10.1007/s11116-024-10513-5>
- 15.Biswas, S., Chandra, S. & Ghosh, I. Effects of On-Street Parking in Urban Context: A Critical Review. *Transp. in Dev. Econ.* 3, 10 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40890-017-0040-2>
- 16.Aggarwal, S., Athira, J., Navandar, Y.V., Krishnamurthy, K., Velmurugan, S. (2024). Traffic Impact Analysis of On-Street Parking Near Signalized Intersections. In: Manoj, M., Roy, D. (eds) *Urban Mobility Research in India*. UMI2023 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 551. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8116-4_15.
- 17.Sha, H., Haouari, R., Singh, M.K. et al. How can on-street parking regulations affect traffic, safety, and the environment in a cooperative, connected, and automated era?. *Eur. Transp. Res. Rev.* 16, 18 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00628-8>
- 18.Spatial effects of factors influencing on-street parking duration in newly built-up areas: A case study in Xi'an, China, *Cities*, Volume 152, 2024, 105250, ISSN 0264-2751. DOI: 10.1016/j.cities.2024.105250
- 19.Hrytsun, Oleh & Lanets, Oleksii & Solodkyy, Serhiy. (2020). Impact of street parking on delays and the average speed of traffic flow. *Transport technologies*. 2020 (1). 33-44. <https://doi.org/10.23939/tt2020.01.033>.
- 20.Sonya Sulistyono, Harnen Sulistio, Ludfi Djakfar, Achmad Wicaksono, Ririn Endah Badriani. On street parking and its impact on road performance. *MATEC Web Conf.* 181 06008 (2018). <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818106008>.
- 21.Diganta Boro, Ahmed M., Ankur Goswami. Impact of On-Street Parking on Traffic Flow Characteristics. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology. Transportation Engineering*. URL: <https://www.academia.edu/25582493/>
- 22.P. H. S. Madushanka, D. N. D. Jayaratne and H. R. Pasindu, "Study of the Impact Roadside Parking has on Traffic Flow Characteristics - A VISSIM Simulation Based Approach," 2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), Moratuwa, Sri Lanka, 2020. Pp. 419-424, doi: 10.1109/MERCon50084.2020.9185354.
- 23.Hamid Athab Eedan Al-Jameel, Rusul Rahman Muzhar, Characteristics of On-street Parking On-street Parking in Al-Najaf City Urban Streets. *Transportation Research Procedia*, Volume 45, 2020. Pp. 612-620. ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.050>.
- 24.Sahan Wijayarathna (2015). Impacts of On-street Parking on Road Capacity. *Australasian Transport Research Forum*. Sydney, Australia. Publication website: <https://surl.li/ewpxhp>
- 25.Rukaya M. Atif, Hasan H. Joni; Effect of on-street parking on traffic flow in the CBD area in Baghdad city using VISSIM simulation. *AIP Conf. Proc.* 26 July 2023; 2775 (1): 060011. <https://doi.org/10.1063/5.0140352>
- 26.Parking Reform Network. PRN: веб-сайт. URL: <https://parkingreform.org/resources/parking-lot-map/>
- 27.Загоруй О.О. Вплив паркування транспорту на пропускну здатність вулично-дорожньої мережі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.01 – «Транспортні системи». К. : Вид-во НТУ, 2007. – 23 с.

REFERENCES

- 1.Amudapuram Mohan Rao, S. Velmurugan, K.M.V.N. Lakshmi, Evaluation of Influence of Roadside Frictions on the Capacity of Roads in Delhi, India. *Transportation Research Procedia*, Volume 25, 2017, Pages 4771-4782, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.489>.

2. Robert M. Brooks. Influence of roadway width and volume to capacity ratio on PCU values. *Transport problems*. Volume 5 issue 2. 2010.
3. Zheng, J., Sun, J., & Yang, J. (2015). Relationship of Lane Width to Capacity for Urban Expressways. *Transportation Research Record*, 2483(1), 10-19. <https://doi.org/10.3141/2483-02>
4. Nikoliuk, P. 2023. Vplyv intelektualnogo svitlofornoho rehuliuвання na propusknу zdатnist miskoho perekhrestia. *Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science*. 1 (Hrud 2023), 37-51. DOI: <https://doi.org/10.31558/2786-9482.2023.1.3>.
5. Mushule, N. K. (2012). Bus Bay Performance and its Influence on the Capacity of Road Network in Dar Es Salaam. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), 107-113. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2012.107.113>
6. Pashkevych S.M., Nykonchuk V.M., Krystopchuk M.Ie. Otsinka propusknoi spromozhnosti miskoi dorozhnoi merezhi z urakhuvanniam propozytsii parkuvannya. *Tsentrалnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. 2023. Vyp. 8(39), ch.I. S. 201 – 2012. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.201-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.201-212)
7. Kalmamat Atabekov, Bakytbek Sarymsakov, Sergey Voinash, Irina Troyanovskaya, Adelya Sayfutdinova, Yuliya Balabanova. Expert Assessment of the Factors of the Impact of Road Capacity on the Environment. *Transportation Research Procedia*, Volume 68, 2023. Pp. 925-930. ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.129>.
8. Levgen Medvediev, Sergiy Soroka. The road network traffic capacity taking into account public transport stops layout method. *TRANSPORT TECHNOLOGIES*. Vol. 1, No. 2, 2020. Pp. 13-22. <https://doi.org/10.23939/tt2020.02.013>
9. BUGAYOV, I., KHOLODOVA, O., BUHAIOVA, M., & KHOLODOV, O. (2024). Case study on implementing traffic calming devices: an example from the street and road network in Kharkiv. *Innovative Technologies in Transportation Engineering*, 1(1), 15-22. https://doi.org/10.36910/conf_avto.v1i1.1389
10. O. B. Potiichuk, L. M. Pilipaka. *Transportni rozviazky: navch. posibnyk*. [Elektronne vydannia]. Rivne: NUVHP, 2020. 263 s. ISBN 978-966-327-481-2
11. Pro zatverdzhennia Pravyl parkuvannya transportnykh zasobiv. RADA. Verkhovna Rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy: veb-sait*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1342-2009-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 25.09.2024).
12. Kholodova O.O. Formuvannya system parkinhiv v tsentralnykh dilovykh chastynakh velykykh ta naibilshykh mist: dys.... k-ta tekhn. nauk: 05.22.01/ Kharkivskyi nats. avtomob.-dorozhnii un-t. Kharkiv, 2013. 228 s.
13. LYTVYN V., TARAN I. (2020). Kilkisna otsinka vplyvu oblashtuvannya parkuvalnykh mist u krainii pravii smuzi na efektyvnist dorozhnogo rukhu. *SUCHASNI TEKHOLOHII V MASHYNOBUDUVANNI TA TRANSPORTI*, 2(15), 41-53. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.391>
14. Geremew, G. Modeling and analyzing the impact of on-street parking on traffic flow: a study of the main highway in Debre Markos Town, Ethiopia. *Transportation* (2024). <https://doi.org/10.1007/s11116-024-10513-5>
15. Biswas, S., Chandra, S. & Ghosh, I. Effects of On-Street Parking in Urban Context: A Critical Review. *Transp. in Dev. Econ.* 3, 10 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40890-017-0040-2>
16. Aggarwal, S., Athira, J., Navandar, Y.V., Krishnamurthy, K., Velmurugan, S. (2024). Traffic Impact Analysis of On-Street Parking Near Signalized Intersections. In: Manoj, M., Roy, D. (eds) *Urban Mobility Research in India*. UMI2023 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 551. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8116-4_15.
17. Sha, H., Haouari, R., Singh, M.K. et al. How can on-street parking regulations affect traffic, safety, and the environment in a cooperative, connected, and automated era?. *Eur. Transp. Res. Rev.* 16, 18 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00628-8>.
18. Spatial effects of factors influencing on-street parking duration in newly built-up areas: A case study in Xi'an, China, *Cities*, Volume 152, 2024, 105250, ISSN 0264-2751. DOI: 10.1016/j.cities.2024.105250
19. Hrytsun, Oleh & Lanets, Oleksii & Solodkyy, Serhiy. (2020). Impact of street parking on delays and the average speed of traffic flow. *Transport technologies*. 2020 (1). 33-44. <https://doi.org/10.23939/tt2020.01.033>.
20. Sonya Sulistyono, Harnen Sulistio, Ludfi Djakfar, Achmad Wicaksono, Ririn Endah Badriani. On street parking and its impact on road performance. *MATEC Web Conf.* 181 06008 (2018). <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818106008>.
21. Diganta Boro. Impact of On-Street Parking on Traffic Flow Characteristics. *Transportation Engineering*. URL: <https://www.academia.edu/25582493/>
22. P. H. S. Madushanka, D. N. D. Jayaratne and H. R. Pasindu, "Study of the Impact Roadside Parking has on Traffic Flow Characteristics - A VISSIM Simulation Based Approach," 2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), Moratuwa, Sri Lanka, 2020. Pp. 419-424, doi: 10.1109/MERCon50084.2020.9185354

23. Hamid Athab Eedan Al-Jameel, Rusul Rahman Muzhar, Characteristics of On-street Parking On-street Parking in Al-Najaf City Urban Streets. *Transportation Research Procedia*, Volume 45, 2020. Pp. 612-620. ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.050>.
24. Sahan Wijayarathna (2015). Impacts of On-street Parking on Road Capacity. *Australasian Transport Research Forum*. Sydney, Australia. Publication website: <https://surl.li/ewpxhp>.
25. Rukaya M. Atif, Hasan H. Joni; Effect of on-street parking on traffic flow in the CBD area in Baghdad city using VISSIM simulation. *AIP Conf. Proc.* 26 July 2023; 2775 (1): 060011. <https://doi.org/10.1063/5.0140352>
26. Parking Reform Network. PRN: veb-sait. URL: <https://parkingreform.org/resources/parking-lot-map/>
27. Zahorui O.O. Vplyv parkuvannia transportu na propusknii zdarnist vulychno-dorozhnoi merezhi: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.01 – «Transportni systemy». K.: Vyd-vo NTU, 2007. 20 s.

O. Kholodova, M. Buhaiova. Efficiency of the city's street and road network, considering the impact of parked vehicles.

Congestion on carriageways due to chaotic parking significantly reduces road capacity, causing congestion, increasing average vehicle delay times, and increasing the risk of road accidents.

The presence of parked cars limits the maneuverability of traffic flow, reduces the efficiency of road space use, and creates additional difficulties for public transport. To assess the impact of parking on traffic capacity, a methodology was used that found that parked vehicles can reduce the capacity of a road section by 2-14 times, depending on the parking angle.

Seven variants of traffic management with different parking schemes have been modelled, which has allowed to establish quantitative dependencies between the location of vehicles and the average traffic delay time. It is determined that the proposed variant of parking at an angle of 0° reduces the delay of one vehicle by 3.6 times, while a complete ban on parking reduces the delay by 5.6 times. All other options for the location of vehicles along the site are impractical due to a significant reduction in throughput.

Recommendations for optimizing the parking policy are proposed, including introducing intelligent parking management systems, zoning of parking spaces, and arranging dedicated lanes for public transport. The obtained results can be used to improve the transport situation in cities by improving traffic and parking.

Key words: street and road network, parking, stopping point, vehicle, capacity, traffic delay, efficiency, traffic management, modeling.

ХОЛОДОВА Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організації та безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: olgakholodova2807@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-4217-0548>.

БУГАЙОВА Марина Олександрівна, старший викладач кафедри організації та безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: kazmar2383@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1889-9555>.

Olga KHOLODOVA, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Assoc. Professor of Department of Traffic Management and Road Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: olgakholodova2807@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-4217-0548>.

Maryna BUHAIOVA, senior lecturer of Department of Traffic Management and Road Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: kazmar2383@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1889-9555>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1750

Цинь Сяосюань, Любий Є.В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ГЕНЕРАЦІЇ МАТРИЦЬ ПАСАЖИРСЬКИХ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ ВИПАДКОВИМ МЕТОДОМ

У даній статті представлено теоретичне обґрунтування результатів генерації матриць пасажирських кореспонденцій випадковим методом. Проведено аналіз базового випадкового методу формування матриці кореспонденцій, у якому використовується рівномірний розподіл випадкових величин для визначення кореспонденцій. Визначено, що такий метод забезпечує максимальну випадковість, що може бути як перевагою (відображення варіативності попиту), так і недоліком (відсутність структурованості у сформованій матриці). Методи формування матриць кореспонденцій ґрунтуються на випадкових величинах, їх розподіли суттєво відрізняються, що впливає на результати транспортного моделювання. Аналітично отримано вираз для закону розподілу кореспонденцій, згенерованих базовим методом, який відображає залежність між випадковими місткостями транспортних районів та підсумковими кореспонденціями. Визначено вплив мінімальної місткості транспортних районів на розподіл значень у матриці кореспонденцій. Визначено, що ця величина не має строгого теоретичного опису і може бути оцінена лише емпірично на основі натурних спостережень та даних реального транспортного попиту. Результати дослідження підтвердили, що базовий метод випадкової генерації матриць кореспонденцій призводить до монотонно спадаючого розподілу кореспонденцій, що слід враховувати при застосуванні цього підходу. Крім того, обґрунтовано необхідність перевірки отриманих моделей на реальних даних для коригування параметрів генерації. Подальший розвиток дослідження передбачає емпіричне визначення характеристик мінімальної місткості транспортних районів та оцінку ефективності нового методу випадкової генерації матриць пасажирських кореспонденцій у рамках інтервальної концепції моделювання транспортного попиту.

Ключові слова: випадкова величина, закон розподілу, матриця пасажирських кореспонденцій, моделювання, транспортний попит.

ВСТУП

Розвиток міських транспортних систем є одним із ключових напрямів забезпечення сталого розвитку сучасних міст. Ефективне транспортне планування базується на точному прогнозуванні попиту на пересування пасажирів, що є основою для розробки схем маршрутної мережі, управління транспортними потоками та оцінки впливу транспортних проєктів.

Найпоширенішою практикою в сфері моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів є використання синтетичних моделей, що базуються на традиційних методах формування матриць пасажирських кореспонденцій (МПК) [1-9]. Однак, такі підходи можна вважати лише проміжною ланкою у процесі моделювання матриць кореспонденцій (МК), оскільки, в своїй більшості, результати розрахунку кореспонденцій потребують коригування, у зв'язку з великими розбіжностями між розрахунковими та фактичними значеннями кореспонденцій. До того ж слід додати й необхідність отримання основної вхідної інформації для розрахунку МК, а саме, даних про місткості транспортних районів (ТР) з відправлення і прибуття пасажирів, які, найчастіше, встановлюються на основі результатів проведення натурних спостережень [2, 3, 6, 7]. До вже наведених недоліків синтетичних моделей формування МПК також можна додати й наступні: агрегованість даних – не відображають динаміку реальних переміщень пасажирів; обмеженість урахування факторів впливу – наприклад, сезонність, індивідуальні поведінкові характеристики пасажирів тощо; детермінованість алгоритмів – не дозволяють адекватно враховувати невизначеність і варіативність транспортного попиту.

З огляду на це, виникає необхідність у розробці більш гнучких та адаптивних методів формування МПК. Одним із перспективних напрямів є використання засобів імітаційного моделювання, зокрема випадкової генерації кореспонденцій з урахуванням можливих обмежень. Це дозволить створювати моделі транспортного попиту в рамках інтервальної концепції (ІК), яка враховує варіативність потреб населення в пересуваннях [1, 10].

Таким чином, для підвищення точності транспортного моделювання необхідна розробка методики формування МПК в рамках ІК моделювання потреб населення у пересуваннях, яка б базувалася на імітаційному підході та враховувала сучасні методи аналізу і прогнозування транспортного попиту. Це сприятиме створенню більш реалістичних моделей міських транспортних систем і забезпечить прийняття ефективних управлінських рішень в галузі моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів громадським транспортом.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Питання моделювання МПК є достатньо вивченим, особливо, з позиції використання синтетичних моделей розрахунку МК [2, 3, 6, 7, 11]. Не дивлячись на суттєві неточності у розрахунках кореспонденцій з використанням синтетичних (апріорних) моделей, вони так і залишаються одним із основних інструментів для формування та оновлення МПК завдяки своїй доступності та економічності, що дозволяє уникнути необхідності проведення коштовних і тривалих польових досліджень; масштабності (можна використовувати для будь-якого міста або регіону, коригуючи лише вхідні параметри); оперативності (дозволяють швидко оновлювати МК за умов зміни транспортної мережі, демографічних показників чи соціально-економічних факторів) та можливості проводити аналіз сценаріїв (дозволяють прогнозувати вплив змін у транспортній системі на мобільність пасажирів без проведення додаткових спостережень).

В свою чергу, використання імітаційних моделей є менш поширеною практикою при моделюванні МПК, які, в теорії, повинні надавати точніші результати, через низку недоліків, серед яких основними є:

- висока ресурсомісткість (для точного моделювання МК необхідно враховувати величезну кількість параметрів, наприклад, індивідуальні поведінкові особливості пасажирів, реальні затримки, погодні умови тощо, що потребує значних обчислювальних ресурсів);
- необхідність великих обсягів вхідних даних (для адекватного функціонування імітаційних моделей потрібні детальні дані про кожен маршрут, характеристики попиту, типи пасажирів, що не завжди доступно або може бути застарілим);
- складність калібрування та валідації (отримані результати потребують ретельного порівняння з реальними даними, що може бути складним і трудомістким процесом);
- менша узагальненість (імітаційні моделі часто адаптовані до конкретної транспортної системи і не завжди добре масштабуються або застосовуються в інших умовах без значних модифікацій).

Попри складність налаштування та високі вимоги до обчислювальних ресурсів, імітаційні моделі є одним із найкращих інструментів для глибокого аналізу МПК у складних транспортних системах, адаптації до змін та тестування різних сценаріїв розвитку міської мобільності. Саме тому вони повинні стати основою для розвитку ІК моделювання потреб населення у пересуваннях і незамінним доповненням до синтетичних моделей у сучасному транспортному моделюванні [1, 10].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є теоретичне обґрунтування результатів генерації МПК випадковим методом, для досягнення якої треба вирішити наступні основні задачі: отримати аналітичний вираз для закону розподілу (ЗР) кореспонденцій, сформованих базовим методом; визначити вплив мінімальної місткості транспортних районів (ТР) на формування кореспонденцій та оцінити можливість її емпіричного визначення; запропонувати підхід для перевірки коректності отриманих моделей генерації МПК на основі експериментальних даних (подальший напрям дослідження).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Особливості запропонованого методу генерації МПК [1] викликають питання щодо відповідності між результатами випадкової генерації МПК у чистому вигляді, без обмежень, та аналогічними результатами, отриманими за допомогою нового методу. В обох випадках базою для імітації матриць виступає описаний раніше метод подвійної генерації [1], де на першому кроці випадковим чином визначається поточний номер клітинки МПК, на другому – ця клітинка заповнюється кореспонденцією, шляхом доповнення її поточного значення новою випадковою величиною. При цьому в обох випадках для генерації використовується рівномірний розподіл, який забезпечує максимально можливий розкид результатів.

Обидва методи імітації МПК, базовий та новий, формують у підсумку випадкові матриці, кожна клітинка в яких містить випадкову величину (ВВ). Але ж отримані кореспонденції являються різними ВВ, оскільки методи їх генерації помітно відрізняються між собою. Тому й властивості цих величин мають бути різними, незважаючи на однакові вихідні дані для генерації. Необхідно оцінити цю різницю між кореспонденціями, для розуміння того, наскільки новий метод відрізняється від базового за результатами. Оскільки базовий метод забезпечує максимальний рівень випадковості при імітації матриць, відмінності нового методу в значному ступені будуть відображати деякі втрати випадковості в результатах генерації МПК. Та, незважаючи на практичну неможливість кількісної оцінки цих втрат, сама по собі різниця у значеннях кореспонденцій є важливою для розуміння не лише змісту отриманих результатів моделювання попиту в рамках ІК, а й надійності результатів моделювання транспортного попиту на основі нової моделі взагалі.

Основною та найбільш повною характеристикою ВВ є її ЗР [12], який відображає взаємозв'язок між значеннями цієї величини та імовірністю їх виникнення в деякій формі (зазвичай табличній або аналітичній). Тому й порівнювати значення кореспонденцій, отриманих за допомогою базового та нового методу генерації МПК, слід за їх ЗР. Задля цього спочатку необхідно отримати уявлення про ЗР кореспонденцій у підсумкових випадкових матрицях та його залежність від вихідних даних, тобто місткостей ТР з відправлення та прибуття. Останні, в свою чергу, також є випадковими, та мають свій ЗР, який можливо оцінити лише емпіричним шляхом, внаслідок відсутності теоретичних передумов їх формування на сучасному рівні розвитку методів транспортного моделювання.

Основну увагу в цьому процесі слід приділити процесу визначення саме величині кореспонденції в матриці, оскільки перший випадковий вибір – її поточного номеру, з точки зору результатів імітації, означає лише вибір конкретної реалізації випадкових значень місткості ТР з відправлення та прибуття. Його вплив реалізується через залежність значень останніх кореспонденцій, для яких поточні місткості ТР з відправлення та прибуття відрізняються від стартових місткостей A_0 та D_0 . Взагалі-то кажучи, кількість таких кореспонденцій, залежних від попередніх реалізацій, є чималою. Але врахувати ці взаємозалежності між кореспонденціями для реальних МПК практично неможливо внаслідок їх великого розміру, який значно перевищує доступну для розгляду кількість ТР у 5 – 6 одиниць, а розгляд матриць такого розміру не має сенсу, внаслідок відсутності для них реальних даних щодо місткостей ТР з відправлення та прибуття.

Тому для оцінки різниці у результатах застосування базового та нового методів генерації МПК слід зупинитися на розгляді лише тих кореспонденцій, які формуються на початку заповнення МПК та не залежать від попередніх розіграшів. Власне цього буде достатньо для оцінки різниці між методами генерації МПК, а вибір поточного номеру кореспонденції, в даному випадку, не здійснює впливу на ЗР кореспонденцій, що робить можливою аналітичну оцінку виду та параметрів ЗР для них.

Задача отримання аналітичного виразу для ЗР кореспонденцій, сформованих базовим методом, являє собою визначення параметрів ВВ, яка виникає в результаті генерації рівномірно розподіленої ВВ з постійною лівою межею 0 та випадковою правою межею розподілу Y . Ця задача, з випадковою межею рівномірного розподілу, не є тривіальною та спочатку необхідно наочно уявити собі особливості цього процесу задля отримання коректного перетворення випадкових місткостей ТР у випадкові кореспонденції за таких умов.

Незважаючи на те, що місткості ТР з відправлення та прибуття зазвичай є безперервними ВВ, та мінімальне значення між прибуттям і відправленням зазвичай також буде безперервним, краще спочатку розглянути процес їх перетворення на прикладі дискретно розподілених місткостей ТР. Це значно спрощує сприйняття процесу виникнення нової ВВ, завдяки наявності чітко визначених проміжків між дискретними значеннями правої межі рівномірного розподілу кореспонденцій. До того ж дискретні місткості ТР з відправлення та прибуття все ж не є забороненими в транспортній науці, а тому при появі завдання на моделювання попиту з дискретними місткостями ТР, перетворення, отримане тут як допоміжне рішення, стане до нагоди, що в рамках даної роботи буде означати отримання загального рішення.

Як відомо, щільність рівномірного розподілу ВВ не залежить від значення аргументу, а залежить лише від довжини відрізка, на якому розподілена ця змінна [12]. У випадку кореспонденції h , з нижньою межею 0 та правою межею Y вона виглядає як

$$f(h) = \frac{1}{Y}, \quad h > 0. \quad (1)$$

Якщо Y є дискретною ВВ розподіленою за якимось відомим законом, то вона має щільність розподілу, тобто зв'язок між її значенням та імовірністю його виникнення у нескінченній серії випробувань. У дискретному випадку властивості місткостей ТР відносять праву межу рівномірного розподілу кореспонденцій до множини натуральних чисел $Y \in [0; \infty]$, а знання ЗР забезпечує для кожного значення з цієї множини відому ймовірність $P(y)$. Так як випадок, коли $Y = 0$ не змінює МПК в процесі її генерації, то у подальшому буде розглядатися дискретна права межа, розподілена на промені $Y \in [1; \infty]$. На цій основі можна записати, що кореспонденції в МПК будуть розподілені наступним чином

$$f(h) = \frac{1}{y}, \text{ з ймовірністю } P(y), \quad (2)$$

де y – реалізація ВВ Y , мінімуму з місткостей ТР.

Тобто у даному випадку всі кореспонденції є рівномірно розподіленими на окремих відрізках з відомою ймовірністю

$$f(h) = \begin{cases} 1, & \text{з ймовірністю } P(1) \\ \frac{1}{2}, & \text{з ймовірністю } P(2) \\ \dots & \\ \frac{1}{y}, & \text{з ймовірністю } P(y) \end{cases}. \quad (3)$$

Для кращого розуміння процесу генерації кореспонденцій на рис. 1 наведений приклад їх розподілу за умови відповідності мінімуму з місткостей ТР з відправлення та прибуття закону Пуассона з параметром $\lambda = 6$, що відображається відповідним розташуванням відрізків вздовж вертикальної осі графіку.

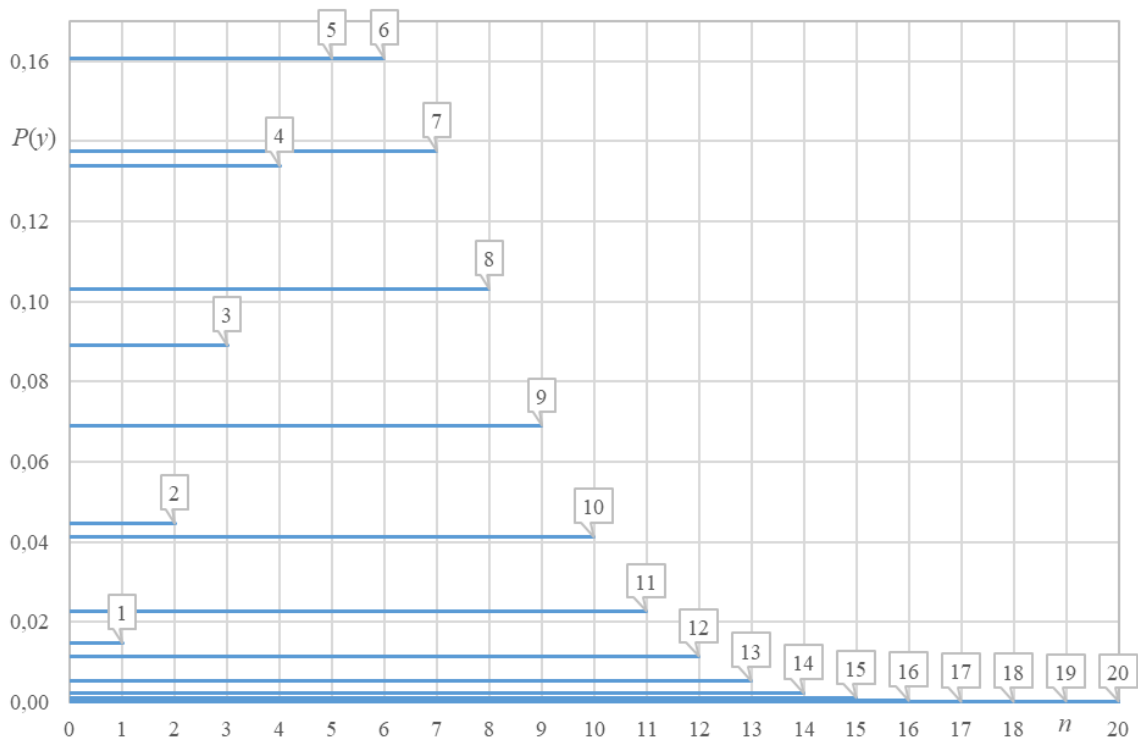


Рисунок 1. Розподіл кореспонденцій в МПК за базовим методом за умови відповідності розподілу правої межі закону Пуассона з параметром $\lambda = 6$

При такому процесі, властивість рівномірного розподілу мати однакову щільність вздовж всього відрізка на якому реалізується ВВ, дозволяє стверджувати, що у випадку, коли права межа розподілу дорівнює 2, наприклад, щільність розподілу кореспонденції може бути переписана наступним чином

$$f(h) = \begin{cases} 1, & \text{з ймовірністю } \frac{P(2)}{2} \\ \frac{1}{2}, & \text{з ймовірністю } P(2) = \frac{1}{2}, & \text{з ймовірністю } \frac{P(2)}{2} \end{cases}. \quad (4)$$

Для даного випадку це обумовлене тим, що рівномірно розподілена на відрізку $[0;2]$ ВВ, з рівною імовірністю розподілена на двох відрізках $[0;1]$ та $[1;2]$. Відповідно до цього, у загальному випадку, для $y = m$

$$f(h) = \begin{cases} 1, & \text{з ймовірністю } \frac{P(m)}{m} \\ \frac{1}{2}, & \text{з ймовірністю } \frac{P(m)}{m} \\ \dots \\ \frac{1}{n}, & \text{з ймовірністю } \frac{P(m)}{m} \end{cases} \quad (5)$$

Тобто, кожне значення правої межі рівномірного розподілу створює відрізок від 0 до себе та, завдяки властивостям рівномірного розподілу, надає всім елементарним відрізкам, з яких складається повний відрізок між 0 та Y , імовірність, яка дорівнює $\frac{P(m)}{m}$, рис. 2.

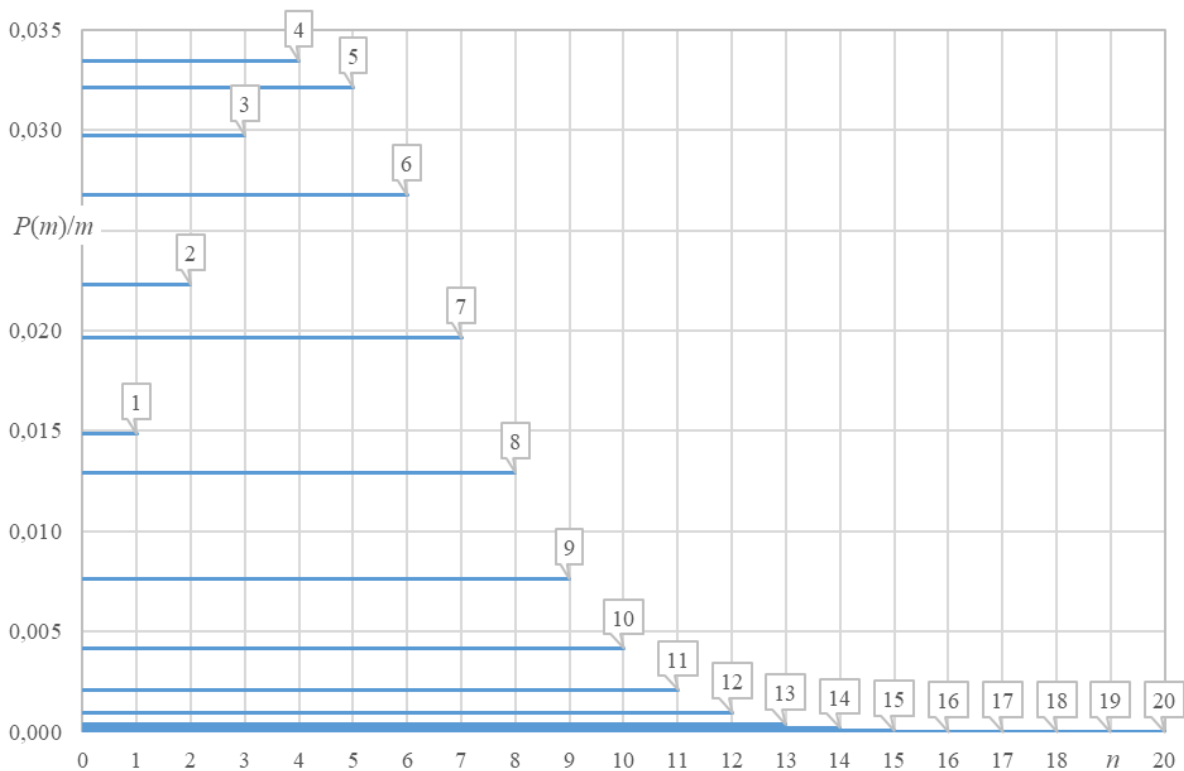


Рисунок 2. Імовірність виникнення кореспонденцій, яка створюється кожним значенням дискретної правої межі

Тобто стартова імовірність рівномірного розподілу на відрізку $[0;2]$, яка у відповідності до закону Пуассона дорівнює $P(2)=0,0446$, насправді приводить до генерації кореспонденцій на відрізках $[0;1]$ та $[1;2]$ з імовірністю $P(2)=0,0223$.

Після підстановки (5) до (3) з'являється можливість перегрупувати рівномірно розподілені ВВ між дискретними значеннями правої межі шляхом об'єднання в єдиний елемент всіх виразів з однаковим знаменником. Для першого натурального числа цей вираз буде виглядати таким чином

$$f(h) = 1, \text{ з ймовірністю } \sum_{m=1}^{\infty} \frac{P(m)}{m} \quad (6)$$

Для $y=2$

$$f(h) = \frac{1}{2}, \text{ з ймовірністю } \sum_{m=2}^{\infty} \frac{P(m)}{m}. \quad (7)$$

Відповідно, у загальному випадку, для всіх u

$$f(h) = \frac{1}{y}, \text{ з ймовірністю } \sum_{m=y}^{\infty} \frac{P(m)}{m}. \quad (8)$$

Отриманий вираз (8) являє собою шукану щільність розподілу величини кореспонденції в МПК, згенерованої за допомогою базового методу, для випадку дискретних місткостей ТР з відправлення і прибуття. Він дозволяє легко перейти до випадку безперервних місткостей ТР з відправлення і прибуття. Ключовим результатом у (8) являється той факт, що завдяки властивостям рівномірного розподілу, його одиничні відрізки дублюються в інших таких же відрізках, що знаходяться правіше від них до самої правої межі з відповідною ймовірністю, що відображається нижньою межею сумування у виразі (8).

Цей процес добре ілюструється рис. 3, на якому наведений результат перетворення дискретних місткостей ТР з відправлення і прибуття в розподіл кореспонденцій при заповненні МПК базовим методом.

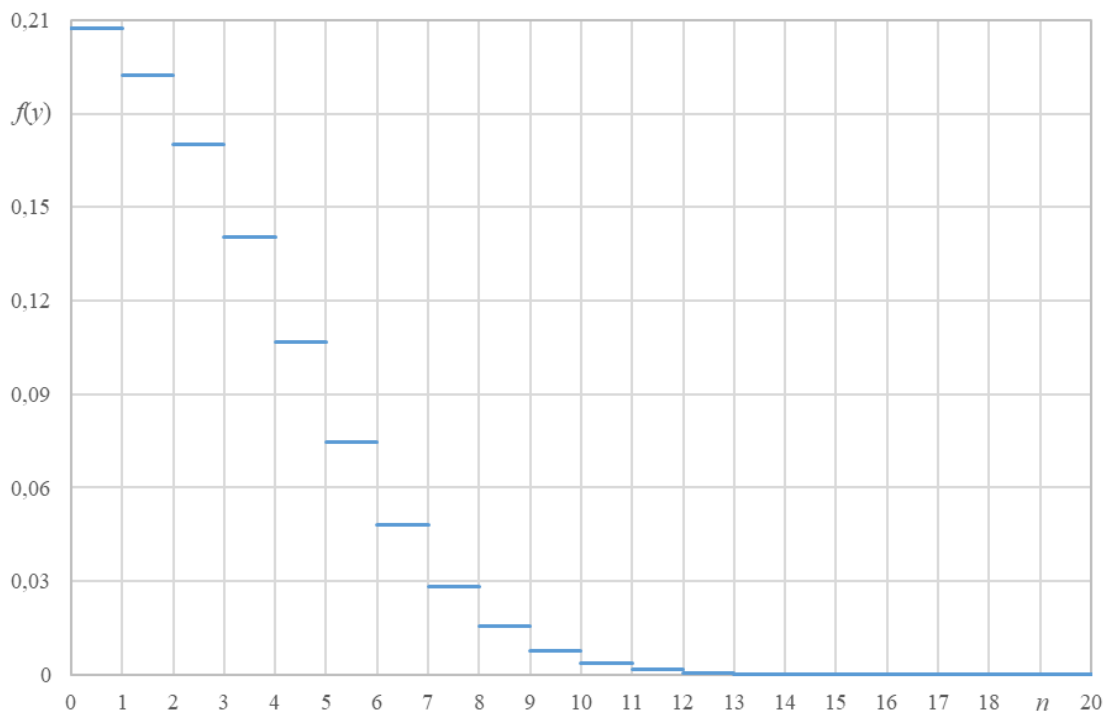


Рисунок 3. Розподіл кореспонденцій в МПК за базовим методом за умови відповідності розподілу правої межі закону Пуассона з параметром $\lambda = 6$

Цей результат свідчить про те, що базовий метод генерації МПК є не дуже чутливим до розподілу мінімуму з місткостей ТР з відправлення і прибуття та в реальних умовах завжди буде приводити до монотонно спадаючого розподілу кореспонденцій, що має бути враховане при реалізації ІК моделювання МПК.

При переході від дискретного до безперервного розподілу, довжини відрізків між окремими значеннями правої межі рівномірного розподілу прагнуть до нуля, значення індексу n , який позначає окреме дискретне значення правої межі цих відрізків $n \rightarrow y$, а сума перетворюється на інтеграл. Тому, якщо щільність розподілу правого кінця відрізка – носія рівномірного розподілу кореспонденцій на відрізок $[0; Y]$ позначити як $g(y)$, то аналогічний (8) вираз для безперервного випадку матиме наступний вигляд

$$f(h) = \int_h^{\infty} \frac{g(y)}{y} dy, \quad (9)$$

де $g(y)$ – щільність розподілу мінімуму з місткостей ТР з відправлення і прибуття.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отриманий вираз (9) описує перетворення рівномірно розподілених випадкових значень, які виникають в процесі генерації МПК, в розподіл кореспонденцій в підсумковій матриці. Користуючись ним можна оцінювати ЗР випадкової величини кореспонденції, якщо задати функцію щільності розподілу мінімуму з місткостей ТР відправлення і прибуття для МПК.

Тому задачу теоретичного обґрунтування результатів генерації МПК базовим, власне випадковим методом слід вважати вирішеною для загального випадку. При цьому ЗР мінімуму з місткостей ТР відправлення і прибуття для кореспонденцій, як вже відзначалась раніше, може бути визначений лише емпіричним шляхом, за допомогою обробки експериментальних даних з існуючих моделей транспортного попиту. Тому завдання перевірки коректності отриманої моделі результатів генерації МПК за допомогою базового методу є наступним кроком даного дослідження.

ВИСНОВКИ

1. Базовий метод випадкової генерації МПК забезпечує максимальний рівень випадковості, що є його ключовою характеристикою. Це означає, що кожна клітинка матриці отримує значення без урахування кореляцій між попередніми реалізаціями, що відображає чистий ефект рівномірного розподілу. Однак такий підхід призводить до монотонно спадаючого розподілу кореспонденцій, що може не відповідати реальному характеру пасажирських потоків.

2. Запропонований новий метод формування МПК використовує інший принцип генерації ВВ у клітинках матриці. Це призводить до певної втрати випадковості у результатах моделювання, що потенційно може покращити відповідність отриманих даних реальним. Однак різниця між методами потребує детальної оцінки, оскільки навіть невеликі зміни у принципах генерації можуть суттєво вплинути на властивості моделі.

3. Отримано аналітичний вираз для ЗР кореспонденцій при їх моделюванні з використанням базового методу генерації. Це дозволяє не тільки оцінити математичні властивості згенерованих матриць, а й пояснити природу виникнення кореспонденцій у кожній клітинці. Використання рівномірного розподілу в поєднанні з випадковими межами дозволяє описати механізм формування кореспонденцій, але не враховує можливих реальних обмежень, наприклад, таких як пропускна здатність транспортної мережі або вплив соціально-економічних факторів.

4. Визначено, що розподіл кореспонденцій суттєво залежить від мінімальної місткості ТР з відправлення та прибуття. У реальних умовах ця місткість може змінюватися залежно від часу доби, попиту, особливостей міського середовища та транспортної інфраструктури. Відсутність точного теоретичного опису розподілу місткостей ТР ускладнює побудову універсальної моделі, тому необхідне емпіричне оцінювання цих параметрів.

5. Базовий метод дозволяє отримати випадкові МПК, але він не гарантує їх відповідності реальним даним. Це ставить питання про його придатність для практичного застосування без додаткових коригувань. Зокрема, отримані результати можуть бути корисними лише в тих випадках, коли основна мета моделювання полягає в аналізі загальних тенденцій, а не точному прогнозуванні пасажиропотоків.

6. Враховуючи складність процесу моделювання транспортного попиту, перевірка коректності отриманих моделей генерації МПК має базуватися на аналізі реальних даних. Це дозволить не тільки оцінити точність застосованих методів, а й розробити можливі механізми коригування результатів. Оскільки наявні моделі транспортного попиту містять значну кількість апроксимаційних припущень, поєднання аналітичного підходу та експериментальних досліджень дозволить отримати більш достовірні результати.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Любий Є.В., Ковцур К.Г., Цинь Сяосюань Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. 2(23). С. 152-158. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>.

2. Любий Є.В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01 «Транспортні системи». Харків: ХНАДУ, 2012. 22 с.
3. Любий Є.В., Колій О.С. Оцінка точності синтетичних моделей розрахунку пасажирських кореспонденцій на прикладі малих міст. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. 1(12). С. 99-106. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.40>.
4. Ortuzar J. de D., Willumsen L.G. Modelling transport. Third edition. John Wiley & Sons Ltd., 2006. 499 p.
5. Wilson A.G. Entropy in Urban and Regional Modelling. London: Pion Limited, 1970. 250 p.
6. Любий Є.В., Россолов О.В. Формування моделі попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом. *Комунальне господарство міст*. 2013. 107. С. 422-426.
7. Білоус А.Б., Демчук І.А. Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 3(3(69)). С. 53–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545>.
8. Zhao D., Mihăiță A.-S., Ou Yu., Grzybowska H., Li Mo. Origin–destination matrix estimation for public transport: A multi-modal weighted graph approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. 165. 104694. ISSN 0968-090X. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104694>.
9. Ramli M.I., Runtulalo D., Yatmar H., Mangessi A. An Estimation of Origin-Destination Matrices for a Public Transport Network in Makassar using Macrosimulation Visum. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 875, The 3rd EPI International Conference on Science and Engineering 2019 (EICSE2019) 24-25 September 2019, South Sulawesi, Indonesia. doi:10.1088/1757-899X/875/1/012027.
10. Івахнік В.С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. 6. С. 57–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>.
11. Dragu. V., Roman. Eu. A. The Origin–Destination Matrix Development. MATEC Web of Conferences. 9th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2019 “Trends in New Industrial Revolution”. 2019. 290. 06010. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929006010>.
12. Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B. Statistical Distributions. 4th Edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. 212 p.

REFERENCES

1. Liubiyi Ye., Kovtsur K., & Qin X. (2024). Formulation of the problem of random completion of the OD-matrix. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, (2(23)), 152-158. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>
2. Liubiyi Ye. (2012). Vyznachennia popytu na peresuvannia naseleennia malykh mist marshrutnym pasazhyrskym transportom : avtoref. dys. zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.22.01 «Transportni systemy». Kharkiv: KhNAHU. 22 p.
3. Liubiyi Ye., & Kolii O. (2019). Estimation of accuracy of synthetic models of calculation of passenger correspondence on an example of small towns, (1(12)), 99-106. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.40>
4. Ortuzar J. de D., & Willumsen L.G. (2006) Modelling transport. 3rd edition. John Wiley&Sons Ltd., 499 p.
5. Wilson A.G. (1970). Entropy in Urban and Regional Modelling. London: Pion Limited, 250 p.
6. Liubiyi Ye., & Rossolov O. (2013). Formation of a model of demand for the movement of the population of small towns by passenger transport. *Municipal economy of cities*. 107. 422-426.
7. Bilous A., & Demchuk I. (2014). Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(3(69)). 53-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545>.
8. Zhao D., Mihăiță A.-S., Ou Yu., Grzybowska H., & Li Mo. (2024). Origin–destination matrix estimation for public transport: A multi-modal weighted graph approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 165. 104694. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104694>.
9. Ramli M.I., Runtulalo D., Yatmar H., & Mangessi A. (2019). An Estimation of Origin-Destination Matrices for a Public Transport Network in Makassar using Macrosimulation Visum. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 875, The 3rd EPI International Conference on Science and

Engineering 2019 (EICSE2019) 24-25 September 2019, South Sulawesi, Indonesia. doi:10.1088/1757-899X/875/1/012027.

10. Ivakhnik V. (2022). A New Method for Implementing the Interval Concept of Transport Demand Modeling. Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute, (6), 57-64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>.

11. Dragu. V., & Roman. Eu. A. (2019). The Origin–Destination Matrix Development. MATEC Web of Conferences. 9th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2019 “Trends in New Industrial Revolution”. 290. 06010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929006010>.

12. Forbes C., Evans M., Hastings N., & Peacock B. (2011). Statistical Distributions. 4th Edition. Hoboken, NJ: Wiley. 212 p.

X. Qin, Ye. Liubyi Theoretical justification of the results of passenger correspondence matrix generation using a random method

This article presents a theoretical justification for the results of generating passenger correspondence matrices using a random method. An analysis of the basic random method for forming the correspondence matrix has been conducted, in which a uniform distribution of random variables is used to determine correspondences. It has been established that this method ensures maximum randomness, which can be both an advantage (reflecting demand variability) and a disadvantage (lack of structure in the formed matrix). The methods for forming correspondence matrices are based on random variables, and their distributions differ significantly, affecting the results of transport modeling. An analytical expression for the distribution law of correspondences generated by the basic method has been derived, reflecting the relationship between the random capacities of transport zones and the resulting correspondences. The influence of the minimum capacity of transport zones on the distribution of values in the correspondence matrix has been determined. It has been found that this parameter does not have a strict theoretical description and can only be estimated empirically based on field observations and real transport demand data. The research results confirmed that the basic method of random generation of correspondence matrices leads to a monotonically decreasing distribution of correspondences, which should be considered when applying this approach. Additionally, the necessity of verifying the obtained models against real data to adjust generation parameters has been substantiated. Further research development involves the empirical determination of the characteristics of the minimum capacity of transport zones and the assessment of the effectiveness of a new method for the random generation of passenger correspondence matrices within the framework of the interval-based concept of transport demand modeling.

Key words: random variable, distribution law, passenger correspondence matrix, modelling, transport demand.

ЦИНЬ Сяосюань, аспірантка кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: xiaoxuan@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0009-3736-619X>.

ЛЮБИЙ Євген Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: lion_khadi@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>.

Xiaoxuan QIN, Post-Graduate Student of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: xiaoxuan@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0009-3736-619X>.

Yevhen LIUBYI, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: lion_khadi@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1751

Чернега В.Ю.

Вінницький національний технічний університет

**ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ «КОЛЕСО-ДОРОГА» ПРИ ЗДІЙСНЕННІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ
АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ**

Перевезення вантажів автомобільним транспортом у сільській місцевості відіграє ключову роль у розвитку аграрного сектору, малого бізнесу та соціальної інфраструктури. Це один із головних механізмів забезпечення життєдіяльності регіонів, оскільки дозволяє швидко та ефективно транспортувати товари, сировину та продукцію навіть у найвіддаленіші куточки країни.

У багатьох сільських районах відсутня розвинена залізнична чи водна логістика, що робить автомобільний транспорт єдиним доступним способом перевезення. Завдяки мобільності та гнучкості маршрутів автомобільні вантажоперевезення забезпечують стабільне постачання товарів, сприяють розвитку економіки та покращують якість життя мешканців сільської місцевості.

Сільська місцевість, у силу своєї географічної та економічної специфіки, стикається з низькою проблемою в організації ефективних автомобільних перевезень. У той час як урбанізовані території мають розвинуті транспортні операторів і добре забезпечені дороги, сільська місцевість часто залишається ізольованою, з обмеженим доступом до важливих інфраструктурних об'єктів. Одним із ефективних підходів до вирішення цієї проблеми є впровадження системи «колесо-дорога», що дозволяє організувати інтегровану платформу для моніторингу та управління автомобільними перевезеннями. Ця стаття зосереджена на методах управління автомобільними перевезеннями для підтримки систем «колесо-дорога», зокрема на сучасних технологіях та підходах для покращення транспортних заходів. У статті розглянуто актуальні проблеми організації автомобільних перевезень у сільській місцевості з урахуванням складних дорожніх умов та обмеженої інфраструктури. Запропоновано удосконалений метод управління перевезеннями, що базується на використанні інформаційно-аналітичної системи «колесо-дорога». Доведено ефективність впровадження інтегрованого підходу, що дозволяє забезпечити стабільність транспортного сполучення, зменшити витрати на експлуатацію та підвищити рівень безпеки перевезень.

Ключові слова: автомобільні перевезення, сільська місцевість, управління транспортом, система «колесо-дорога», дорожня інфраструктура, оптимізація маршрутів.

ВСТУП

Автомобільні перевезення відіграють одну з найважливіших ролей у транспортному обслуговуванні сільських територій. В умовах розвиненого суспільства, зростання потреб у швидкому та ефективному переміщенні людей і вантажів, автомобільний транспорт стає основним засобом транспортування в сільській місцевості. Він забезпечує зв'язок між віддаленими населеними пунктами, сприяє розвитку економіки та підвищенню якості життя населення.

Однією з головних переваг автомобільного транспорту є його здатність забезпечити доступ до сільських територій навіть у найвіддаленіших регіонах. Сільські дороги, хоча й часто знаходяться в поганому стані, можуть бути доступними для транспортних засобів, що забезпечує зв'язок сіл з районними центрами, містами і навіть іншими країнами. Важливим аспектом є також те, що автомобільний транспорт може бути мобільним і адаптуватися до змінних умов – наприклад, в умовах сезонних змін (замети, зливи) автомобілі можуть використовувати не тільки основні дороги, а й альтернативні маршрути, що робить перевезення більш стійкими.

Автомобільний транспорт у сільських районах активно використовується для перевезення сільськогосподарської продукції. Це може включати як доставку продовольчих товарів (зерно, молоко, овочі), так і техніки, будівельних матеріалів або інших товарів для сільського господарства. Автомобільні перевезення є найбільш ефективними для малих партій вантажів, що надходять від фермерських господарств або малих підприємств.

У сільських районах, де залізничні чи авіаційні зв'язки можуть бути обмеженими або зовсім відсутніми, автомобільний транспорт набуває особливого значення. Цей вид транспорту має великі переваги в порівнянні з іншими: доступність, гнучкість маршрутів, можливість перевезення різноманітних вантажів і пасажирів, а також здатність забезпечити зв'язок між віддаленими територіями.

Ефективна організація автомобільних перевезень у сільській місцевості є складним завданням, що обумовлено цілою низкою специфічних факторів. Передусім, це низька щільність населення, яка призводить до нерівномірного розподілу попиту на транспортні послуги як у просторі, так і в часі. У результаті формується обмежений ринок перевезень, що знижує рентабельність роботи транспортних підприємств у таких регіонах.

Крім того, важливу роль відіграє обмеженість дорожньої інфраструктури, що проявляється як у недостатній протяжності доріг із твердим покриттям, так і в невідповідності існуючих шляхів сучасним вимогам до безпеки та пропускну здатності. Додатковими викликами є сезонні коливання попиту на транспортні послуги, обумовлені переважно аграрною специфікою сільських територій. Під час польових робіт, збору врожаю або сезонної міграції населення попит на перевезення різко зростає, тоді як у міжсезоння він суттєво знижується.

Розвиток автомобільного транспорту в сільських районах сприяє створенню нових робочих місць. Це стосується не тільки водіїв, але й обслуговуючого персоналу, таких як механіки, диспетчери, а також працівники пунктів технічного обслуговування та ремонтних станцій. Додатково, автомобільні перевезення можуть сприяти розвитку дрібного бізнесу, зокрема служб таксі, оренди транспорту, транспортних логістичних компаній тощо.

Перевезення сільськогосподарської продукції є важливою складовою агропромислового комплексу. Автомобільний транспорт дозволяє фермерам швидко доставити продукцію на ринок або на підприємства з переробки. Це забезпечує збереження свіжості товарів і зменшує втрати. У свою чергу, наявність якісного транспортного сполучення сприяє розвитку сільського господарства, збільшує прибутковість виробництва та дозволяє розширити ринки збуту.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сфері взаємодії досліджень «колесо-дорога» накопичено значний науковий продукт, який є основою для подальшого розвитку системи автомобільних перевезень. відповідно, в роботах Іванова І.І. [1] розглядаються питання зміни конструкції шин на зчеплення з дорожнім покриттям, що є фактором виробництва для забезпечення руху та зниження безпеки гальмівного шляху транспортних засобів.

В дослідженнях Сидоренка О.О. [2] особлива увага приділяється параметрам дорожнього покриття, його шорсткості, матеріальному складу, які разом впливають на знос шин і витрати палива під час перевезення. Автор наводить результати експериментальних досліджень з оптимізації дорожніх покриттів для зниження опору кочення.

Праці Коваленка В.В. [3] присвячені аналізу сучасних технологій присвячені аналізу сучасних технологій виробництва шин та новітніх матеріалів, які можуть підвищити довговічність шин та зменшити їх вплив на навколишнє середовище. Особливо цінними є дослідження з використанням нанотехнологій при створенні шин нового покоління.

Крім того, у роботах Міжнародної асоціації автомобільного транспорту [4] наведені статистичні дані та аналітичні огляди ефективності щодо впровадження сучасних систем моніторингу стану дорожнього полотна та впливу кліматичних факторів на параметри взаємодії «колесо-дорога».

В цілому, аналіз наявних наукових публікацій про зростання актуальності тематики, спрямованих на вдосконалення системи «колесо-дорога», що обумовлено потребою підвищення енергоефективності, безпеки та екологічності автомобільних перевезень.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Обґрунтування ефективності застосування системи «колесо-дорога» в процесі організації та здійснення автомобільних перевезень. Дослідження спрямовані на аналіз взаємодії між конструктивними характеристиками автомобільних шин, дорожнім покриттям та умовами використання транспортних засобів з метою підвищення безпеки руху, зниження витрат пального, покращення екологічних показників та підвищення економічної ефективності перевезень. У роботі також розглядаються перспективи впровадження інноваційних технологій у системі «колесо-дорога» для забезпечення сталого розвитку транспортної галузі.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Автомобільний транспорт є важливим елементом для поліпшення якості життя в сільських районах. Доступ до медичних, освітніх та культурних послуг підвищує рівень соціального благополуччя. Мобільність дозволяє сільським жителям мати доступ до більш широкого спектру послуг, що важливо для розвитку людського капіталу. Крім того, покращення транспортної доступності сприяє зменшенню депопуляції в сільській місцевості.

Однією з головних проблем є стан дорожнього покриття, особливо в осінньо-зимовий період. Багато сільських доріг мають ґрунтове або гравійне покриття, що часто ускладнює рух транспорту під час дощів, снігопадів чи морозів. Відсутність належного освітлення, знаків і вказівників також є проблемою, яка знижує рівень безпеки на дорозі.

Іншою важливою проблемою є нерентабельність перевезень на деяких сільських маршрутах. Це особливо стосується тих населених пунктів, де низький пасажиропотік або відсутність регулярного попиту на перевезення. В таких випадках перевізники вимушені або знижувати частоту рейсів, або взагалі припиняти обслуговування таких маршрутів.

У сільських районах часто спостерігається нестача сучасних транспортних засобів, що знижує ефективність перевезень. Використання старого або технічно несправного транспорту створює додаткові проблеми, пов'язані з поломками та безпекою перевезень.

Підвищення вартості пального суттєво впливає на економічну ефективність автомобільних перевезень у сільських районах. Висока ціна пального збільшує витрати на транспортування, що, в свою чергу, підвищує вартість послуг для населення.

Особливої уваги потребує незадовільний стан автомобільних доріг, який часто ускладнюється впливом кліматичних і погодних факторів. Часті опади, паводки, весняне танення снігу призводять до руйнування дорожнього полотна, що підвищує ризики аварій, збільшує витрати на обслуговування транспорту і знижує ефективність логістичних процесів.

У таких умовах система «колесо-дорога», що враховує взаємодію транспортного засобу із дорожнім покриттям, постає як перспективний інструмент для підвищення ефективності управління автомобільними перевезеннями в сільській місцевості. Основна ідея цієї концепції полягає в комплексному підході до проектування, експлуатації та технічного обслуговування як транспортних засобів, так і доріг. Врахування взаємного впливу «колеса» та «дороги» дозволяє знизити експлуатаційні витрати, оптимізувати витрати палива, збільшити термін служби шин і ходової частини транспортних засобів, а також підвищити загальну безпеку перевезень.

Ключовими напрямками впровадження системи «колесо-дорога» є:

- аналіз і класифікація дорожніх покриттів у сільських регіонах з метою підбору відповідних конструкцій шин, які забезпечують оптимальне зчеплення з дорогою за будь-яких умов;
- застосування адаптивних транспортних засобів, обладнаних системами регулювання тиску в шинах, що дозволяє підлаштовувати характеристики автомобіля під умови конкретної дороги;
- розробка рекомендацій щодо режимів експлуатації транспортних засобів, включаючи оптимальні швидкісні режими, маршрути руху та графіки перевезень із врахуванням сезонних змін стану дорожньої мережі;
- використання цифрових технологій моніторингу дорожнього полотна і телеметричних систем для отримання актуальних даних щодо стану доріг у режимі реального часу.

Застосування цих підходів у рамках системи «колесо-дорога» сприятиме підвищенню ефективності роботи автотранспорту, забезпечить стабільність логістичних потоків і сприятиме розвитку транспортної інфраструктури сільських територій.

Забезпечення якісних автомобільних перевезень у сільській місцевості є одним із ключових чинників сталого соціально-економічного розвитку територій. Ефективна транспортна система сприяє підвищенню мобільності населення, забезпечує доступ до основних соціальних послуг — освіти, охорони здоров'я, адміністративних центрів — і створює передумови для інтеграції сільських громад до загальнонаціонального економічного простору.

Завдяки поліпшенню транспортної доступності мешканці сільських районів отримують ширші можливості щодо працевлаштування, зокрема, шляхом доступу до ринків праці у сусідніх містах або промислових зонах. Крім того, ефективна логістика забезпечує своєчасне транспортування сільськогосподарської продукції на переробні підприємства та ринки збуту, що підвищує конкурентоспроможність місцевого виробництва й сприяє економічному зростанню.

Проте для досягнення цих цілей необхідно удосконалити існуючі методи управління перевезеннями, орієнтуючись на специфіку сільської місцевості. Серед основних викликів варто відзначити велику протяжність транспортних маршрутів при невеликій щільності населення, нерівномірний розподіл попиту на перевезення, а також сезонні ускладнення дорожньої інфраструктури.

У цьому контексті використання сучасних інформаційних технологій відіграє ключову роль. До найбільш перспективних напрямів належать:

1. ГІС-технології (геоінформаційні системи) для збору та аналізу даних про стан дорожньої інфраструктури, що дозволяє оперативно планувати ремонти, визначати оптимальні маршрути перевезень та уникати аварійно небезпечних ділянок доріг.

2. Інтелектуальні транспортні системи (ITS), які забезпечують моніторинг трафіку в реальному часі, оптимізацію маршрутів і графіків перевезень, що особливо актуально під час пікових навантажень у періоди сільськогосподарських кампаній.

3. Системи управління автопарком (Fleet Management Systems), що дозволяють контролювати технічний стан транспорту, рівень витрат палива, маршрути та час доставки вантажів. Це сприяє зниженню операційних витрат і підвищенню ефективності роботи автотранспорту.

4. Цифрові платформи для координації перевезень і взаємодії з громадою, що можуть забезпечити прозорий механізм замовлення транспортних послуг, формування спільних поїздок (карпулінг) і підвищення доступності пасажирських перевезень навіть у віддалених населених пунктах.

5. Технології прогнозування попиту на основі аналізу великих даних (Big Data), що дозволяє визначати потенційні маршрути з найвищою потребою в перевезеннях у різні пори року.

Впровадження подібних рішень не лише сприятиме зниженню витрат на організацію перевезень у сільській місцевості, а й забезпечить підвищення якості транспортних послуг, що безпосередньо впливає на добробут населення та стимулює розвиток сільських громад.

Таким чином, удосконалення системи управління автомобільними перевезеннями із залученням сучасних інформаційних технологій є стратегічно важливим завданням, спрямованим на формування ефективної та доступної транспортної інфраструктури в сільській місцевості.

Метою розробленого методу є підвищення ефективності управління автомобільними перевезеннями в сільській місцевості за рахунок оптимізації взаємодії транспортних засобів і дорожньої інфраструктури шляхом застосування системи «колесо-дорога».

Основними завданнями методу є оцінка стану дорожньої інфраструктури та умов експлуатації транспорту; підбір конструктивних характеристик автомобільної техніки та шин під конкретні дорожні умови; розробка рекомендацій з режимів експлуатації транспортних засобів; оптимізація маршрутів з урахуванням параметрів взаємодії «колесо-дорога».

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Система «колесо-дорога» — це комплексна взаємодія транспортного засобу (його ходової частини, зокрема коліс та шин) і дорожнього покриття, що забезпечує ефективність, безпеку й економічність перевезень. У цій системі ключову роль відіграє оптимальна відповідність параметрів колеса умовам дороги, що дозволяє підвищити прохідність техніки, зменшити знос як транспортних засобів, так і дорожньої інфраструктури.

Завданням системи є забезпечення надійної передачі тягових зусиль, ефективного гальмування, стійкості на поворотах і поглинання нерівностей дорожнього покриття.

Основними елементами є колесо, яке виконує роль опорного елемента, який передає навантаження від транспортного виклику на дорогу. Шина забезпечує контактну взаємодію з дорожньою поверхнею, амортизує удари та коливання. Вибір типу шин (літні, зимові, всесезонні), їх характеристики (шиповані чи ні, рівень тиску, конструкція протектора) впливають на зчеплення з дорогою, стійкість до аквапланування та витрати палива та дороги, які поділяються за типом покриття: асфальтобетонне, цементобетонне, гравійне, ґрунтове тощо. Кожен із видів має свої особливості в контексті зчеплення з колесами, тертям, зносом. Стан дороги (сухий, мокрий, обмерзлий, забруднений) також суттєво впливає на якість взаємодії. Система «колесо-дорога» являє собою комплексну транспортну інфраструктуру, що включає спеціально облаштовані дорожні покриття та адаптовані транспортні засоби (рис.1).

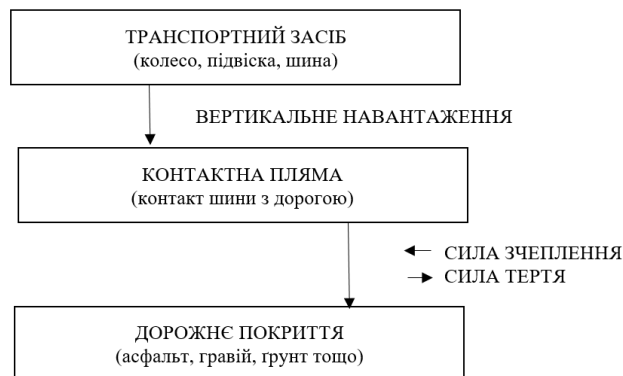


Рисунок 1 - Схема взаємодії системи «Колесо-Дорога»

Хоча система «Колесо-Дорога» має багато переваг, існують певні недоліки та виклики, які можуть впливати на її ефективність, вартість впровадження та експлуатацію.

Для створення спеціальних дорожніх покриттів, адаптивних транспортних засобів та інтелектуальних систем контролю потрібні значні фінансові вкладення.

Використання новітніх матеріалів та технологій (полімери, стабілізатори ґрунту, датчики) підвищує базову вартість проєкту.

Деякі регіони з обмеженим бюджетом можуть не мати достатнього фінансування для реалізації проєкту. Довгий термін окупності, оскільки початкові витрати потрібно відшкодовувати за рахунок майбутньої економії на обслуговуванні доріг.

Для впровадження потрібні висококваліфіковані спеціалісти у сфері дорожнього будівництва, матеріалознавства та інтелектуальних транспортних систем. Багато традиційних дорожніх компаній можуть не мати достатнього досвіду роботи з новими технологіями. Необхідність навчання персоналу та залучення експертів, що збільшує витрати. Ризик помилок при будівництві, якщо технології будуть застосовуватися неправильно.

У багатьох регіонах вже існують традиційні дороги, і їх перетворення на систему «Колесо-Дорога» може бути складним та дорогим. Для повноцінного функціонування потрібні адаптовані транспортні засоби, що означає додаткові витрати для перевізників. Тривалий перехідний період, поки нова інфраструктура стане основною. Перевізники, які не мають спеціального транспорту, можуть стикатися з обмеженнями у використанні доріг цієї системи.

Використання штучних полімерів у дорожньому покритті може викликати забруднення довкілля у разі руйнування матеріалів. Деякі технології можуть потребувати хімічних стабілізаторів, які можуть негативно впливати на ґрунти та ґрунтові води. Необхідність екологічного контролю та розробки стратегій утилізації старих покриттів. Ризик регуляторних обмежень, якщо матеріали не відповідатимуть екологічним стандартам.

Дорожні покриття, розроблені для низькотискових шин і адаптивних підвісок, можуть бути менш ефективними для традиційних вантажівок та легкових авто. У разі невідповідності транспорту вимогам системи, може збільшитися зношення шин і деталей ходової частини. Перевізникам доведеться оновлювати автопарк, що може бути витратним процесом. Водії, які використовують традиційні шини та підвіску, можуть відчувати дискомфорт або підвищене навантаження на транспорт.

Деякі типи полімерних та стабілізованих покриттів можуть погано переносити екстремальні температури (морози, сильну спеку). У регіонах із частими змінами кліматичних умов можливе прискорене старіння покриття або його деформація. Необхідність використання морозостійких та термостабільних матеріалів, що підвищує вартість будівництва. Додаткові витрати на перевірку та тестування покриттів у різних кліматичних умовах.

У таблиці 1 наведено порівняння ключових показників ефективності автомобільних перевезень до та після впровадження системи «Колесо-дорога». Вона відображає, як змінюються витрати на транспорт, швидкість перевезень, зношення автомобілів та якість доріг після використання нової технології. Основні елементи таблиці є середня швидкість транспорту – після впровадження системи підвищується з 40 км/год до 55 км/год, що скорочує час перевезень; споживання пального (л/100 км) – зменшується з 15 л до 12 л завдяки рівнішій дорозі, що знижує опір руху; кількість ремонтів дороги на рік – зменшується більш ніж удвічі, що свідчить про довговічність нового покриття; зношення транспортних засобів – після запровадження технології стає нижчим, оскільки адаптивні колеса та якісніші дороги зменшують ударні навантаження; час доставки вантажу – скорочується на 25%, що підвищує продуктивність логістичних операцій.

Таблиця 1 Основні показники ефективності

Параметр	До впровадження	Після впровадження «Колесо-дорога»	Покращення (%)
Середня швидкість транспорту	40 км/год	55 км/год	+37%
Споживання пального (л/100 км)	15 л	12 л	-20%
Кількість ремонтів дороги на рік	8	3	-62%
Зношення	Високе	Низьке	-50%

транспортних засобів			
Час доставки вантажу (години)	4	3	-25%

Таблиця 1 демонструє, що система «Колесо-дорога» значно покращує ефективність перевезень, зменшуючи експлуатаційні витрати, підвищуючи безпеку та скорочуючи час у дорозі. Це робить систему економічно вигідною для використання в сільських та віддалених регіонах.

ВИСНОВКИ

Впровадження системи «Колесо-дорога» має низку суттєвих переваг, які позитивно впливають на транспортну інфраструктуру, економіку та довкілля.

Використання стабілізованих ґрунтів, полімерних матеріалів або армованих поверхонь дозволяє зменшити вартість будівництва та знизити необхідність частого ремонту. Зменшується потреба в дорожніх матеріалах (асфальт, бетон), що робить систему доступнішою для регіонів із обмеженим фінансуванням.

Рівномірна дорожня поверхня знижує тертя, що дозволяє транспорту рухатися ефективніше та зменшує витрати пального до 20-25%. Завдяки зменшенню гальмування та прискорення транспорт працює у більш оптимальному режимі.

Якісне покриття доріг та використання адаптивних коліс зменшує знос шин, амортизаторів і ходової частини автомобілів. Частота аварійних поломок і необхідність ремонту знижуються на 30-40%.

Завдяки покращеній якості доріг швидкість перевезень може зрости на 30-40%, що скорочує час доставки вантажів і пасажирів. Водії можуть рухатися більш плавно, без різких маневрів та необхідності уникати ям і вибоїн.

Дороги, створені за технологією «Колесо-дорога», витримують більші навантаження, що дозволяє використовувати важку техніку та великогабаритний транспорт. Зменшується ризик руйнування дорожнього покриття під дією великої ваги.

Економія пального зменшує викиди CO₂ та шкідливих речовин у повітря. Менше вихлопних газів сприяє покращенню якості повітря, особливо у сільській місцевості. Використання місцевих матеріалів для будівництва та мінімізація потреби в асфальті та бетоні зменшує екологічне навантаження. Знижується необхідність видобутку піску, щебеню та інших природних ресурсів.

Дороги, створені за технологією «Колесо-дорога», мають дренажні властивості, що зменшує ерозію ґрунту та запобігає заболоченню територій. Відсутність хімічних складових у дорожніх покриттях запобігає забрудненню підземних вод.

Краща транспортна доступність сприяє розвитку регіонів, забезпечує доступ до медичних, освітніх та соціальних послуг. Збільшується мобільність населення, що дає змогу людям швидше діставатися роботи чи навчання.

Покращення дорожньої інфраструктури сприяє залученню інвестицій у регіон, відкриттю нових підприємств та збільшенню товарообігу. Аграрні підприємства отримують можливість швидше та дешевше транспортувати свою продукцію, що зменшує втрати через псування товарів.

Впровадження системи «Колесо-дорога» приносить значні переваги для економіки, транспорту, довкілля та суспільства. Це ефективне рішення для розвитку регіонів із поганою дорожньою інфраструктурою, яке забезпечує стійке економічне зростання, екологічну безпеку та підвищення рівня життя населення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Іванов І.І. Дослідження впливуДослідження впливу конструктивних особливостей шин на динаміку автомобіля // Вісник транспортних технологій. – 2020. – № 12. – С. 55–62.
- 2.Сидоренко О.О. Вплив параметрів дорожньогоВплив параметрів дорожнього покриття на безпеку автомобільного руху // Автомобільний транспорт. – 2021. – № 30. – С. 45–51.
- 3.Коваленко В.В., Мельник С.С. Експлуатаційна надійність дорожнього покриття в умовах сезонних змін: монографія. – Київ: Дорога і Транспорт, 2019. – 228 с.
- 4.Міжнародна асоціація автомобільного транспорту (IRU)Технології доріг для сталого транспорту . – Інновації в технологіях доріг і шин для сталого транспорту. – Женева, 2022. – 45 с.
- 5.Леонova, Т. В. Управління транспортною інфраструктурою сільських територій: методи та технології. Харків: ХНТУСГ, 2017. С. 42-47
- 6.Шаповалова, М. В. *Автомобільний транспорт в Україні: тенденції та виклики сучасного розвитку*. Одеса: ОНУ, 2018. С. 69-76

- 7.Гудзь, М. М. *Транспортні системи та їх розвиток у сільських районах: досвід України та зарубіжних країн*. Харків: НТУ "ХПІ", 2021. С. 81-83
- 8.Якубовський, А. А. *Автомобільний транспорт і проблеми розвитку транспортної інфраструктури сільських територій України*. Чернівці: ЧНУ, , 2020. С. 55-57
- 9.Іванов, В. О. *Аналіз та оптимізація управління транспортними потоками на сільських дорогах*. Київ: Інститут транспорту, , 2019. С. 121-126
- 10.Голик, О. М. *Транспортне забезпечення сільських територій України: проблеми та перспективи розвитку*. Київ: Наукова думка, , 2016. С. 36-42

REFERENCES

1. *Ivanov I.I.* Study of the influence of design features of tires on vehicle dynamics // Bulletin of Transport Technologies. – 2020. – No. 12. – P. 55–62.
2. *Sydorenko O.O.* Influence of road parametersThe influence of road surface parameters on road traffic safety // Automobile Transport. – 2021. – No. 30. – P. 45–51.
3. *Kovalenko V.V., Melnyk S.S.* Operational reliability of road surface under seasonal changes: monograph. – Kyiv: Doroga i Transport, 2019. – 228 p.
4. International Road Transport Association (IRU)Road technologies for sustainable transport. – Innovations in road and tire technologies for sustainable transport. – Geneva, 2022. – 45 p.
5. *Leonova, T. V.* Management of transport infrastructure of rural areas: methods and technologies. Kharkiv: KhNTUSG, 2017. P. 42-47
6. *Shapovalova, M. V.* Road transport in Ukraine: trends and challenges of modern development. Odesa: ONU, 2018. P. 69-76
7. *Gudz, M. M.* Transport systems and their development in rural areas: experience of Ukraine and foreign countries. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021. P. 81-83
8. *Yakubovsky, A. A.* Road transport and problems of development of transport infrastructure of rural areas of Ukraine. Chernivtsi: ChNU, , 2020. P. 55-57
9. *Ivanov, V. O.* Analysis and optimization of traffic flow management on rural roads. Kyiv: Institute of Transport, , 2019. P. 121-126
10. *Golyk, O. M.* Transport provision of rural areas of Ukraine: problems and development prospects. Kyiv: Naukova Dumka, , 2016. P. 36-42

Chernega V.Yu. Application of the "wheel-road" system in road transportation

Road freight transport in rural areas plays a key role in the development of the agricultural sector, small businesses and social infrastructure. It is one of the main mechanisms for ensuring the livelihood of regions, as it allows for the rapid and efficient transport of goods, raw materials and products even to the most remote corners of the country.

Many rural areas lack developed rail or water logistics, which makes road transport the only available means of transportation. Due to the mobility and flexibility of routes, road freight transport ensures a stable supply of goods, contributes to economic development and improves the quality of life of rural residents.

Rural areas, due to their geographical and economic specifics, face a low problem in organizing effective road transport. While urbanized areas have developed transport operators and well-equipped roads, rural areas often remain isolated, with limited access to important infrastructure facilities. One of the effective approaches to solving this problem is the implementation of the "wheel-road" system, which allows organizing an integrated platform for monitoring and managing road transportation. This article focuses on methods of road transportation management to support "wheel-road" systems, in particular, on modern technologies and approaches to improving transport measures. The article considers the current problems of organizing road transportation in rural areas, taking into account difficult road conditions and limited infrastructure. An improved method of transportation management is proposed, based on the use of the "wheel-road" information and analytical system. The effectiveness of implementing an integrated approach is proven, which allows ensuring the stability of transport connections, reducing operating costs and increasing the level of transport safety.

Keywords: road transportation, rural areas, transport management, "wheel-road" system, road infrastructure, route optimization.

ЧЕРНЕГА Віталій Юрійович – аспірант, аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: vitalij019283@gmail.com

Vitaliy CHERNEGA– graduate student, graduate student of the Department of Automobile and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: vitalij019283@gmail.com

DOI 10.36910/automash.v1i24.1752

ПЕРЕЛІК РЕЦЕНЗЕТІВ

Бартоломейчик Миколай, доктор інженерії, Політехніка Гданська (Польща).

Грабовець Віталій Валерійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Дембіцький Валерій Миколайович, к.т.н., доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Дударєв Ігор Миколайович, д.т.н., професор, професор кафедри технологій і обладнання переробних виробництв ЛНТУ.

Захарчук Віктор Іванович, д.т.н., професор, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Кравченко Олександр Петрович, доктор технічних наук, професор, Університе Жиліни, Словаччина

Матейчик Василь Петрович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет

Мурований Ігор Сергійович, к.т.н., доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії ЛНТУ.

Налобіна Олена Олександрівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських робіт і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування.

Пустюльга Сергій Іванович, д.т.н., професор, професор кафедри архітектури та дизайну ЛНТУ.

Самостян Віктор Русланович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Самчук Володимир Петрович, к.т.н., доцент, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії ЛНТУ.

Сахно Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор кафедри «Автомобілі», Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Сітовський Олег Пилипович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ.

Стельмашук Валерій Віталійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій ЛНТУ

Таран Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор, Ржешівська Політехніка, Польща

Толстушко Микола Миколайович, к.т.н., доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування ЛНТУ.

Цизь Ігор Євгенович, к.т.н., доцент, доцент кафедри аграрної інженерії ім. проф. Г.А. Хайліса ЛНТУ.

Шимчук Сергій Петрович, к.т.н., доцент, доцент

LIST REVIEWERS

Nikolai Bartolomeychyk, Doctor of Engineering, Gdansk Polytechnic (Poland).

Vitaliy Grabovets - Ph.D., Associate Professor, Department of Automobiles and Transport Technologies of LNTU.

Valery Dembitsky, Ph.D., Associate Professor, Department of Automobiles and Transport Technologies of LNTU.

Igor Dudarev, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment for Manufacturing of LNTU.

Viktor Zakharchuk, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of Automobile and Transport Technologies Department of LNTU.

Alexander Kravchenko, Dr. Sc. Tech., prof., professor Department of Transport and Handling Machines, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Vasyl Mateichyk, Doctor of Science (Engineering), professor, National Transport University

Igor Murovanyi, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical Engineering of Lutsk NTU.

Olena Nalobina, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Construction, Road, Reclamation, Agricultural Works and Equipment, National University of Water Management and Nature Management.

Sergiy Pustulga, Doctor of Science (Engineering), Professor of Architecture and Design department LNTU.

Victor Samostyan, Ph.D., Associate Professor Assoc., Professor of Automobile and Transport Technologies Department of LNTU

Volodymyr Samchuk, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Department of Civil Engineering and Civil Engineering LNTU.

Volodymyr Sakhno, Doctor of Science in Engineering, Professor of Automobiles Department, National Transport University, Kiev, Ukraine.

Oleg Sitovsky, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Department of Automobiles and Transport Technologies of LNTU.

Valery Stelmashchuk, Ph.D in Engeneering, Associate Professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University

Igor Taran, Doctor of Science in Engineering, Professor, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza, Poland.

Mykola Tolstushko, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industry Engineering of LNTU.

Igor Tsizh, Ph.D., Associate Professor, Assoc. Professor of the Department Agricultural Engineering of LNTU.

Sergiy Shymchuk, Ph.D, Associate Professor, Associate

кафедри галузевого машинобудування ЛНТУ.

Ярошевич Микола Павлович, д.т.н., професор,
професор кафедри галузевого машинобудування
ЛНТУ.

Professor of the Department of Industry Engineering of
LNTU.

Mykola Yaroshevych, Doctor of Science in Engineering,
Professor, Department of Sector Engineering of LNTU.

Ціна договірна

Колектив авторів

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ

ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ SCIENTIFIC JOURNAL

Випуск 1 (24), 2025 Volume 1 (24), 2025

Видається двічі на рік Publication Frequency: 2 issues per year

Комп'ютерний набір та верстка: В. Самостян

Матеріали друкуються в авторській редакції. За стилістику і орфографію статей відповідальність несуть автори.

Адреса редакції:
вул. Львівська, 75, ауд. 148, Луцьк,
Волинська обл., Україна, 43018.
тел. (0332) 74-61-31.
e-mail: tehavtomash@gmail.com

Підписано до друку 23.05.2024 р.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 27,6. Обл. вид. арк. 19,71. Тираж 100 прим.

Інформаційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.

Друк – Вежа-Друк. Зам. № 132.
(м. Луцьк, вул. Шопена, 12, тел. (0332) 29-90-65).
Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України
ДК № 4607 від 30.08.2013 р.