

УДК 621.311.031

Ю.В. Грицюк, І.В. Грицюк, А.В. Гадай  
Луцький національний технічний університет

## ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ І КОМПЕНСАЦІЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ШИНОПРОВОДАХ (СТРУМОПРОВОДАХ)

Грицюк Ю.В., Грицюк І.В., Гадай А.В. **Визначення втрат і компенсація реактивної потужності в шинопроводах (струмопроводах).** В статті представлені математичні моделі розрахунку компенсації реактивних навантажень в шинопроводах та струмопроводах до 1000 В для різних випадків їх застосувань.

Грицюк Ю.В., Грицюк І.В., Гадай А.В. **Определение потерь и компенсация реактивной мощности в шинопроводах (токопроводах).** В статье представлено математические модели расчёта компенсации реактивных нагрузок в шинопроводах и токопроводах до 1000 В для разных случаев их применения.

Hrytsiuk H.V., Hrytsiuk I.V., Hadaay A.V. **Determination of losses and compensation of reactive power in busbars (current cables).** In article mathematical models of calculation of compensation of reactive power in busbars and current cables to 1000 V for different cases of they use are represented.

**Постановка проблеми.** Основними негативними факторами, що викликаються передачею реактивної потужності елементами електричної мережі є збільшення струму в електричній мережі, підвищення впливу споживачів на стійкість вузлів навантаження, збільшення втрат активної потужності, збільшення витрат енергоресурсів, збільшення втрат напруги та ін. Отже, перетікання реактивної енергії електричними мережами супроводжується зростанням втрат активної енергії і погіршенням якості електропостачання споживачів. Втрати електричної енергії у струмопровідних частинах і магнітних системах електричної мережі, що зумовлені перетіканням реактивних струмів, негативно впливають на техніко-економічні показники роботи електропередавальних організацій та споживачів електроенергії, і в кінцевому результаті ведуть до нераціонального використання енергетичних і матеріальних ресурсів.

Серед факторів негативного впливу перетікання реактивної потужності електромережами особливе місце займає збільшення втрат електроенергії. Пояснюється це відносною простотою його оцінювання в грошовому вигляді.

На переробних підприємствах АПК цехові розподільчі мережі можуть виконуватись шинопроводами або струмопроводами.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблемі компенсації реактивних навантажень (КРН) присвячено багато праць, але тільки в [1] розглядається випадок, коли за умовою регулювання напруги батарею конденсаторів (БК) необхідно підключати в одній точці струмопровода з рівномірно розподіленим навантаженням. В новому нормативному документі [2] цьому питанню взагалі не приділено уваги, в той час, коли розподіл електроенергії на промислових підприємствах є одним із основних. Ще більш поширеним випадком є шинопроводи з рівномірно розподіленим навантаженням незначної потужності (наприклад, цехи з обробки шариків на підшипникових заводах і т. ін.). Незначна потужність електроприймачів зумовлює застосування для шинопроводів групової компенсації. Сюди ж можна віднести струмопроводи з рівномірно і нерівномірно розподіленим навантаженням з відгалуженнями до електроприймачів, опорами яких можна знехтувати.

**Формулювання цілі статті.** Зважаючи на те, що у діючих нормативних документах недостатньо розглянуте питання компенсації реактивних навантажень в струмопроводах (шинопроводах), що створює певні труднощі при проектуванні компенсації в електричних мережах споживачів, доцільно розробити математичні моделі для визначення втрат активної потужності в струмопроводах (шинопроводах) в залежності від точки приєднання БК та побудувати алгоритми розрахунку втрат в струмопроводах (шинопроводах) і визначення точки приєднання БК.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для визначення точки підключення БК до шинопроводу запропоновані графо-аналітичні моделі, які реалізуються програмним способом.

Для випадку шинопроводу з рівномірно розподіленим навантаженням і однаковою довжиною ділянок магістральної і розподільчої частини шинопроводу (наприклад, при приєднанні шинопроводу безпосередньо до цехової ТП, а не через кабельну лінію ТП (рисунк1) ) сумарні

втрати активної потужності в шинопроводі з врахуванням компенсації в залежності від точки підключення (рисунки 1), в кВт, визначається за виразом (1).

$$\Delta P_{ш} = \frac{10^{-3}}{U_H^2} \cdot R_{дл} \cdot \left[ \sum_{i=0}^{n+1} (Q_i - Q_K)^2 \right] \cdot K_d, \quad (1)$$

де  $U_H$  – номінальна або середня фактична напруга цехової мережі, кВ;

$R_{дл}$  – активний опір ділянки шинопровода (між точками приєднання ЕП);  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ;

$n$  – кількість ділянок шинопровода, включаючи загальну ділянку (магістральну частину шинопровода);  $n+1$  – кількість точок підключення БК до шинопровода;

$Q_i$  – реактивне навантаження  $i$ -ї ділянки шинопровода;

$Q_K$  – потужність БК, кВАр;

$K_d$  – коефіцієнт додаткових втрат в шинопроводі, зумовлених поверхневим ефектом і ефектом близькості, а також втратами в конструкції шинопроводу [3].

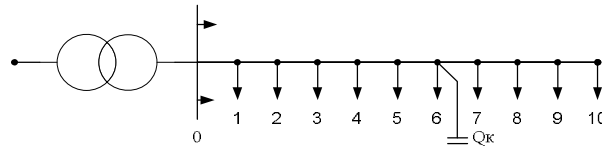


Рис. 1. Можливі підключення БК до шинопровода:  
 ( $i=0, 1, \dots, n$ ); 1-10 – електроприймачі;  $Q_K$  - батарея конденсаторів; ЦТП – цехова трансформаторна підстанція;  $L_M$  - магістральна частина шинопровода, м

Реактивне навантаження  $i$ -ї ділянки шинопровода (струмопроводу) можна розрахувати за формулою:

$$Q_i = \sum_{j=i+1}^{n+1} Q_j - Q_K, \quad (2)$$

де  $Q_i$  - реактивне навантаження  $i$ -ї ділянки шинопроводу (струмопроводу), величину якого необхідно визначити, кВАр;

$Q_j$  - реактивне навантаження  $j$ -го відгалуження, ( $\sum_{j=1}^{n+1} Q_j = Q$ ), кВАр;

$n$  – кількість ділянок шинопроводу (струмопроводу);

$i=0, 1, 2, 3, \dots, n$ ;

$n+1$  – кількість відгалужень (навантажень) шинопроводу (струмопроводу) в його розподільній частині;

$j=1, 2, 3, \dots, n+1$ ;

$Q_K$  - реактивна потужність батареї конденсаторів, яка визначена шляхом попередніх розрахунків для даного шинопроводу (струмопроводу), кВАр.

Вважається, що реактивне навантаження струмопроводу, чи шинопровода  $Q$  відоме (окремого електроприймачів  $Q_j$ ). Оптимальні значення вхідної реактивної потужності для шинопроводів визначені за критерієм мінімальних втрат із виразу:

$$Q_{ei} = \frac{Q_{e.ц.} \cdot R_{p.ц.}}{R_{ш.i}}, \quad (3)$$

де  $Q_{ei}$  - оптимальне значення вхідної реактивної потужності на ввіді  $i$ -го струмопроводу (шинопровода), кВАр;

$Q_{e.ц.}$  - вхідна реактивна потужність на вході цехової підстанції, кВАр;

$R_{p.ц.}$  - еквівалентний активний опір мереж, приєднаних до цехової підстанції, Ом;

$R_{ш.i}$  - активний опір  $i$ -го шинопровода (до цехової підстанції можуть бути приєднані і радіальні мережі), Ом.

Сумарна потужність батареї конденсаторів, яку необхідно підключити до шинопровода, визначається із умови балансу реактивних потужностей на його ввіді:

$$Q_{ki} = Q_{ши} - Q_{ei}, \quad (4)$$

де  $Q_{ши}$  - реактивне сумарне навантаження  $i$ -го шинопровода, кВАр;

$Q_{ki}$  - сумарна потужність БК, яку необхідно приєднати до шинопровода, кВАр;

$Q_{ei}$  - вхідна реактивна потужність на ввіді  $i$ -го шинопровода, кВАр.

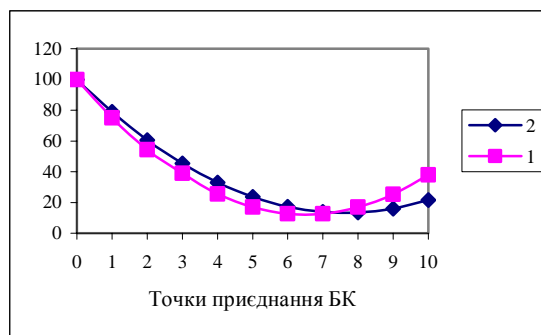


Рис. 2. Графік зміни втрат електроенергії у шинопроводі в залежності від точки приєднання БК (у % до максимального значення  $\Delta P_M$ ):

1- при  $Q=500$  квар і  $Q_k=400$  квар;

2- при  $Q=700$  квар і  $Q_k=400$  квар.

З рисунку 2 видно, що зі збільшенням реактивного навантаження шинопровода при однакових його параметрах точка підключення БК зміщується в сторону цехової підстанції.

Розглянемо випадок, коли довжина магістральної частини струмопроводу (шинопровода) може змінюватись, а опори ділянок магістральної частини залишаються однаковими, навантаження відгалужень однакове і розподілене рівномірно.

Математична модель для визначення втрат активної потужності в шинопроводі для даного випадку, в кВт:

$$\Delta P_{ш} = \frac{10^{-3}}{U_H^2} \cdot \left[ (Q_M - Q_K)^2 \cdot R_M + R_{дл} \cdot \sum_{i=0}^{n+1} (Q_i - Q_K)^2 \right] \cdot K_D, \quad (5)$$

де  $Q_M$  - реактивна потужність, яка перетікає через магістральну частину ШР, кВАр;

$R_M$  - активний опір магістральної частини шинопровода, Ом;

$n$  - кількість ділянок в розподільчій частині шинопровода

$n+1$  - кількість точок приєднання БК в розподільчій частині шинопровода;

$R_{дл}$  - активний опір  $i$ -ї ділянки розподільчої частини шинопровода, Ом.

На рисунку 3 показані криві зміни втрат електроенергії в шинопроводі в залежності від зміни точок приєднання і довжини магістральної частини шинопровода.

Бачимо, що зміна довжини магістральної частини шинопровода не призводить до зміни точки оптимального приєднання батареї конденсаторів, тобто при якій мають місце найменші втрати. Змінюється лише питома вага втрат в магістральній і розподільчій частині шинопровода (струмопроводу).

Основна частка втрат у всіх випадках припадає на магістральну частину шинопровода, вона складає 60-85%. Відповідно, на розподільчу частину припадає 15 - 40%. Оптимізація розміщення БК у шинопроводі дозволяє зменшити втрати до 5,5 - 8,5% від втрат, коли відсутня компенсація реактивної потужності. Збільшення довжини магістральної частини призводить до зменшення рівня мінімальних втрат (із-за зменшення втрат в розподільчій частині шинопровода в загальних втратах).

Можуть бути випадки, коли довжина ділянок (секцій) шинопровода однакова при різних рівномірно розподілених по довжині навантаженнях (активних і реактивних),

при цьому довжина магістральної частини може бути рівною або відрізнятися від довжини ділянки розподільчої частини. В першому випадку математична модель для визначення втрат в шинопроводі в залежності від точки приєднання БК буде аналогічною виразу (1), в другому – виразу (5).

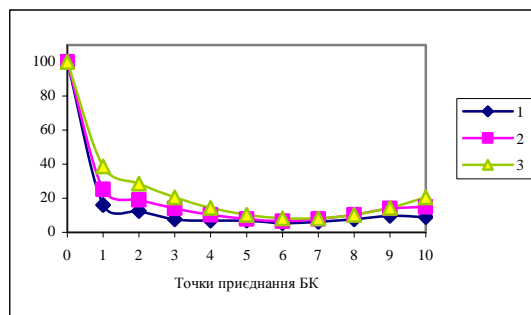


Рис. 3. Графік зміни втрат електроенергії у шинопроводі в залежності від точки приєднання БК (у % до максимального значення втрат  $\Delta P_m$ ) і довжини магістральної частини шинопровода  $L_m$ :

1 –  $L_m=200\text{м}$ ; 2 –  $L_m=100\text{м}$ ; 3 –  $L_m=50\text{м}$ .

На рисунку 4 показані криві, які характеризують залежності втрат потужності, у відсотках від найбільших втрат, від точки приєднання БК при різних навантаженнях відгалужень.

Точка приєднання БК до шинопровода з найменшими втратами і рівень втрат залежить від розподілу навантажень по його довжині. Якщо більші навантаження зосереджені в першій половині розподільчої частині шинопровода, то точка приєднання з найменшими втратами буде зміщуватись в сторону ТП від його середини і навпаки.

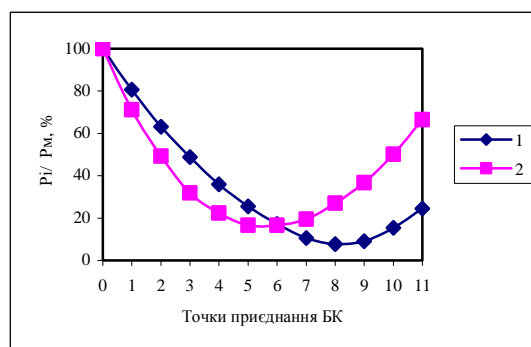


Рис. 4. Залежність втрат активної потужності в шинопроводі (струмопроводі) від точки приєднання БК при різних реактивних навантаженнях його відгалужень: 1 – 60% навантажень приєднано до точок 1-5; 2 – 60% навантажень приєднано до точок 7-11.

Можливі також випадки, коли до шинопровода приєднані різні за величиною реактивні навантаження, розподілені по його довжині нерівномірно (опір ділянок шинопровода різний). Математична модель для визначення втрат і точки приєднання БК з найменшими втратами має вигляд:

$$\Delta P_{\text{ш}} = \frac{10^{-3}}{U_{\text{н}}^2} \cdot \left[ (Q_{\text{м}} - Q_{\text{к}})^2 \cdot R_{\text{м}} + R_{\text{дл}i} \cdot \sum_{i=0}^{n+1} (Q_i - Q_{\text{к}})^2 \right] \cdot K_{\text{д}}, [\text{kВт}], \quad (6)$$

де  $U_{\text{н}}$  - номінальна або середня фактична напруга цехової мережі, кВ;

$R_{\text{дл}i}$  - активний опір  $i$ -ї ділянки розподільчої частини струмопроводу (шинопровода);  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ;

$n$  - кількість ділянок шинопровода, включаючи загальну ділянку (магістральну частину шинопровода);  $n+1$  - кількість точок підключення БК до шинопровода;

$Q_i$  - реактивне навантаження  $i$ -ї ділянки розподільної частини струмопроводу (шинопровода);

$Q_{\text{к}}$  - потужність БК, кВАр;

$Q_{\text{м}}$  - реактивна потужність, яка перетікає через магістральну частину ШР, кВАр;

$K_{\text{д}}$  - коефіцієнт додаткових втрат в шинопроводі, зумовлених поверхневим ефектом і ефектом близькості, а також втратами в конструкції шинопровода.

В даному випадку точка приєднання БК до шинопровода (струмопроводу), при якій забезпечуються найменші втрати, буде залежати від розподілу реактивних навантажень по ділянках шинопровода і їх опорів. Варіантів співвідношень цих параметрів може бути безліч, відповідно будуть змінюватись і точки приєднання.

Отже, запропоновані моделі розрахунку втрат активної потужності в шинопроводах дозволяють точно визначити точку оптимального приєднання БК, при якій забезпечуються найменші втрати активної потужності.

Побудована структурна схема алгоритму розрахунку втрат в струмопроводах (шинопроводах) і визначення точки приєднання БК, яка забезпечує найменші втрати, на ПЕОМ з використанням системи програмування "Turbo Pascal 7.0" для різних застосувань струмопроводів і шинопроводів за наведеними математичними моделями (1), (4), (5), (11) показана на рисунку 5.

За наявності програми розрахунку (додаток А) на ПЕОМ задача визначення оптимальної точки підключення БК до шинопровода (струмопроводу) вирішується без труднощів. Але для знаходження оптимальної, за критерієм мінімальних втрат активної потужності, точки приєднання необхідно обрахувати всі можливі точки приєднання або принаймні, до точки, в якій проявилась тенденція до збільшення втрат після точки екстремума. Для цього бажано мати оптимізаційну модель прямого визначення точки приєднання, яка дозволяє суттєво зменшити обсяг обчислювальної роботи.

Оскільки втрати активної потужності пропорційні опору струмопроводу і квадрату реактивної потужності, яка передається через нього, то справедливе співвідношення:

$$\frac{L_0}{L_p} = \frac{\Delta P_{\text{min}}}{\Delta P_{\text{max}}}. \quad (7)$$

Звідки

$$L_0 = \frac{L_p \cdot \Delta P_{\text{min}}}{\Delta P_{\text{max}}}, \quad (8)$$

де  $L_0$  - відстань між точками розподільної частини струмопроводу (шинопровода) до точки приєднання батареї конденсаторів, яка забезпечує найменші втрати у розподільній частині струмопроводу, м;

$L_p$  - довжина розподільної частини струмопроводу (шинопровода), м;

$\Delta P_{\text{min}}$  - найменші втрати активної потужності в струмопроводі (шинопроводі), які відповідають відстані  $L_0$  до точки приєднання БК (за критерієм мінімальних втрат), кВт;

$\Delta P_{\max}$  - найбільші втрати активної потужності в розподільній частині струмопровода (шинопровода) у випадку приєднання БК з низької сторони трансформатора або вкінці магістральної, на початку розподільної частини струмопровода (шинопровода), тобто при відсутності компенсації в розподільній частині струмопровода, кВт.

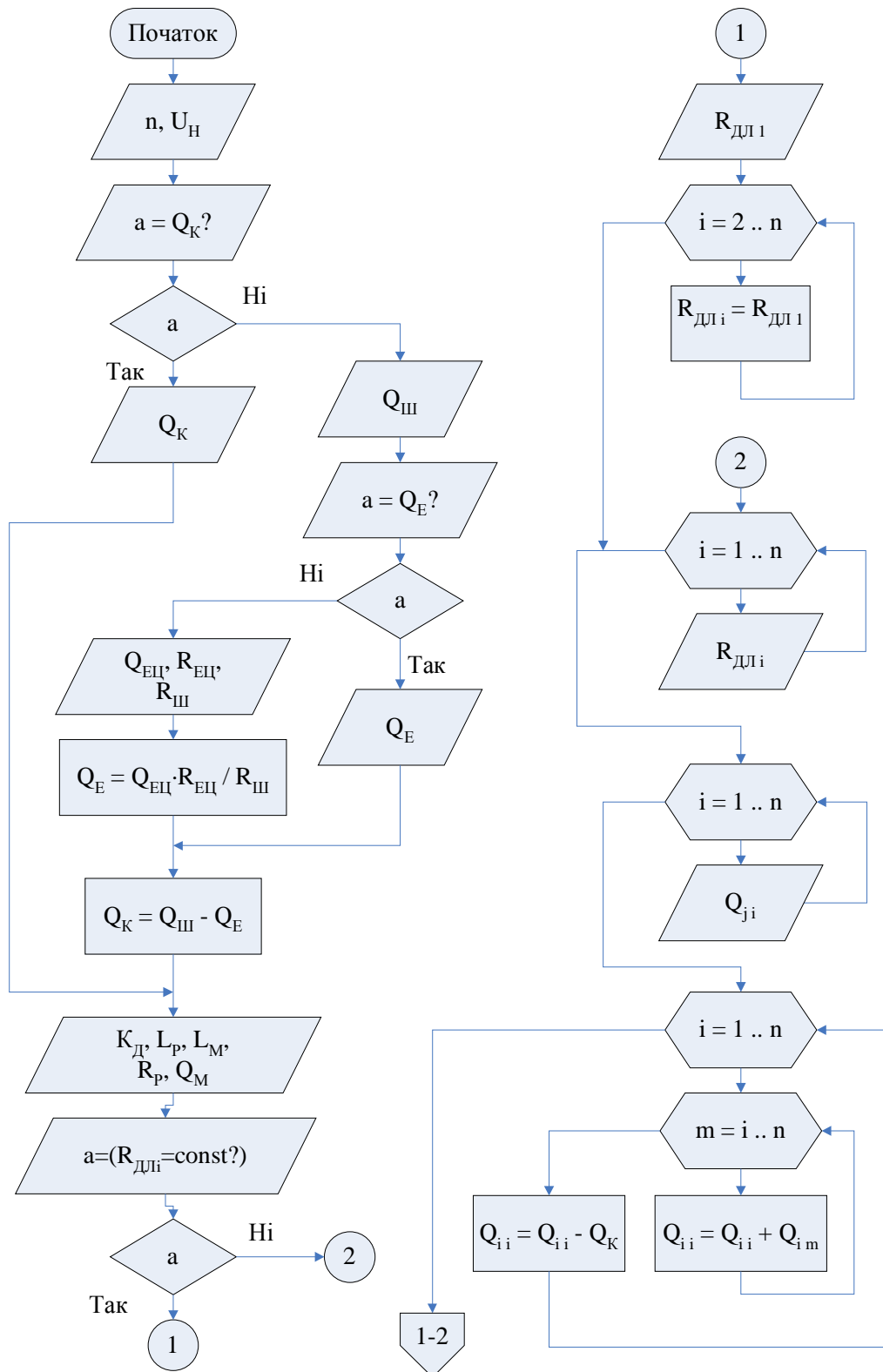


Рис. 5. Структурна схема алгоритму розрахунку втрат в струмопроводах (шинопроводах) і визначення оптимальної точки приєднання БК

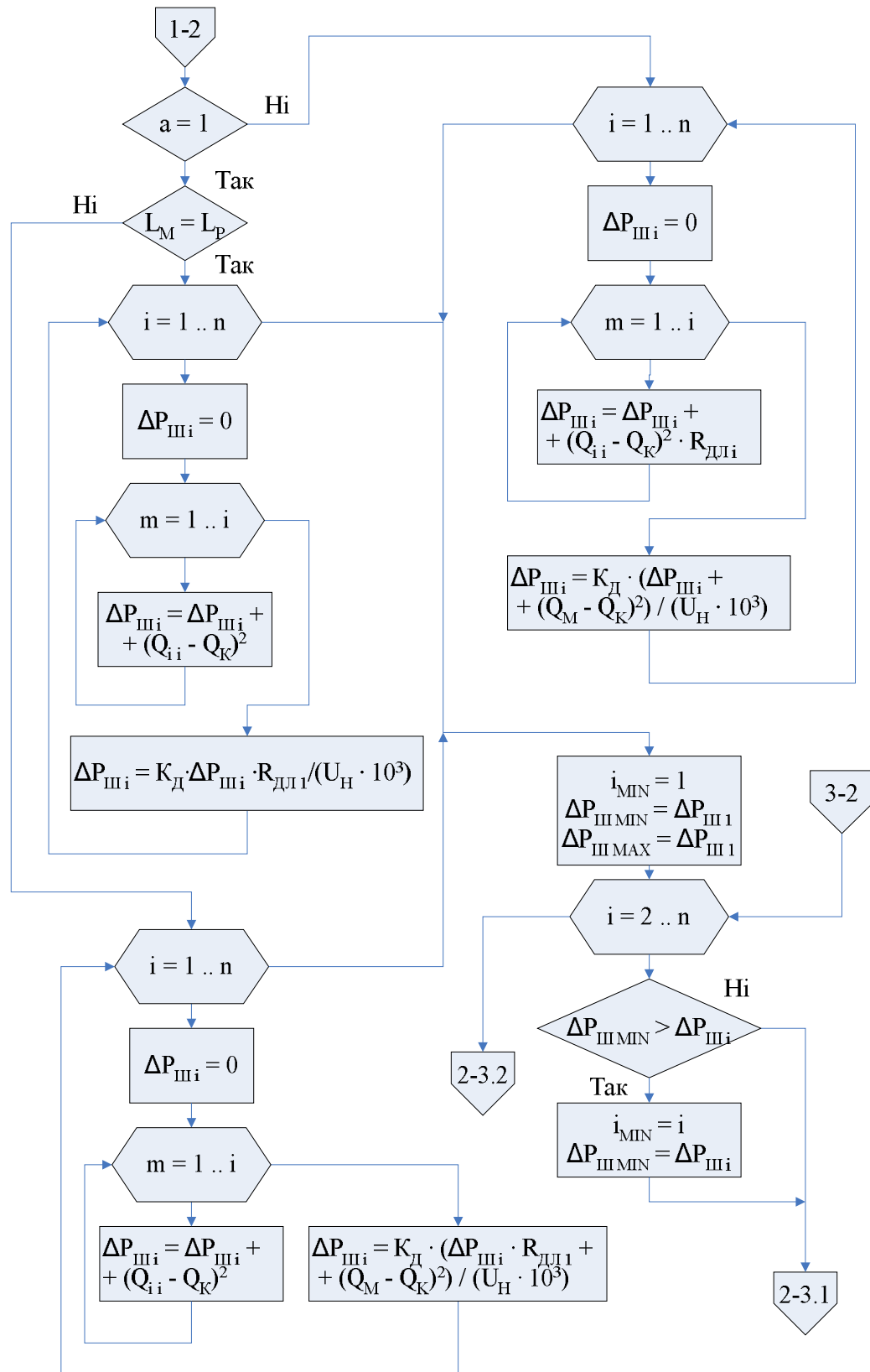


Рис. 5 (продовження)

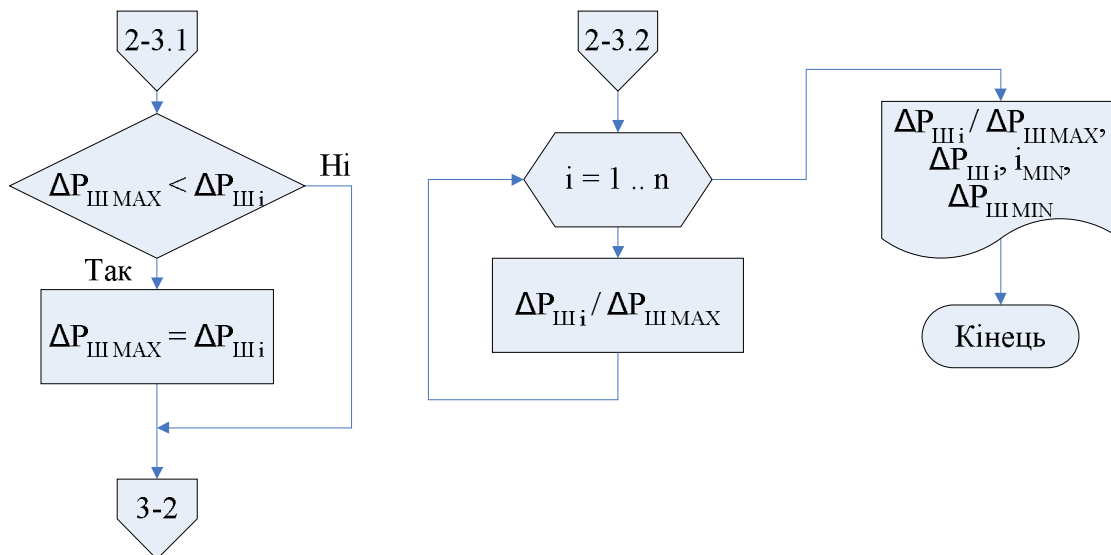


Рис. 5 (закінчення)

Слід зазначити, що величина  $\Delta P_{\min}$  включає дві складові:

$$\Delta P_{\min} = \Delta P_{\text{н.д.}} + \Delta P_{\text{н.с.}}, \quad (9)$$

$\Delta P_{\text{н.д.}}$  - втрати активної потужності в розподільній частині струмопроводу від його початку до точки приєднання БК, зумовлені перетіканням недокомпенсованої, тобто, залишкової реактивної потужності по ділянках струмопроводу до електроприймачів, кВАр;

$\Delta P_{\text{н.с.}}$  - втрати реактивної потужності від перетікань реактивної потужності на ділянках струмопроводу після точки приєднання БК, тобто, на ділянках струмопроводу, в яких реактивне навантаження не компенсується, кВт.

Величина  $\Delta P_{\text{н.д.}}$  залежить від економічно і технічно обґрунтованого ступеня компенсації реактивного навантаження струмопроводу :

$$a_{\text{опт}} = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{н}}}, \quad (10)$$

де  $Q_{\text{к}}$  - потужність БК, визначена для струмопроводу, кВАр;

$Q_{\text{н}}$  - реактивне навантаження струмопроводу, кВАр.

При приєднанні БК вкінці струмопроводу на всіх його ділянках буде здійснюватись часткова або повна компенсація реактивних навантажень. При цьому сумарні втрати в незначній мірі підвищуються за рахунок зворотних перетоків реактивної потужності (рисунок 2). Оскільки величина  $\Delta P_{\min}$  може бути визначена тільки після знаходження відстані до точки приєднання БК, то за величину  $\Delta P_{\min}$  приймемо втрати в струмопроводі при приєднанні БК в його кінці. Тоді відстань від початку розподільної частини струмопроводу до точки приєднання БК (за критерієм мінімальних втрат) визначимо із співвідношення втрат в струмопроводі при приєднанні БК на початку і вкінці його розподільної частини. Формула (2.8) після відповідних перетворень запишеться так:

$$L_0 = L_p \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{\text{к}})^2}{\sum_{i=1}^n Q_i^2}, \quad (11)$$



де  $Q_i$  - реактивне навантаження  $i$ -ї ділянки розподільної частини струмопроводу, кВАр.

$Q_K$  - потужність БК, визначена для струмопроводу, кВАр;

У випадку нерівномірного розподілу навантажень по довжині розподільної частини струмопроводу формула (1.9) переписеться так:

$$L_0 = L_p \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_K)^2 \cdot R_i}{\sum_{i=1}^n Q_i^2 \cdot R_i}, \quad (12)$$

де  $R_i$  - активний опір  $i$ -ї ділянки розподільної частини струмопроводу, Ом.

З врахуванням магістральної частини струмопроводу формули (11), (12) запишуться у вигляді:

$$L_0 = L_M + L_p \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_K)^2}{\sum_{i=1}^n Q_i^2}, \quad (13)$$

$$L_0 = L_M + L_p \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_K)^2 \cdot R_i}{\sum_{i=1}^n Q_i^2 \cdot R_i}, \quad (14)$$

За формулами (13), (14) визначається відстань від силового трансформатора цехової трансформаторної підстанції (ТП) до точки приєднання БК в розподільній частині струмопроводу. Для того чи іншого струмопроводу при зміні точки приєднання БК до струмопроводу (шинопроводу) за формулами (13) – (14) представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати розрахунку точки приєднання батареї конденсаторів до струмопроводу (шинопроводу) за критерієм мінімальних втрат

№ п/п	Задані параметри навантаження БК струмопроводу (шинопроводу)				Результати розрахунку		
	$Q$ , кВАр	$Q_K$ , кВАр	$L_M$ , м	$L_p$ , м	$L_0$ , м	$L_{0.т}$ , м	Ділянка струмопроводу і точка приєднання БК
1	500	400	10	100	50	60	5 ділянка, 6 точка (рис.2)
2	500	400	200	100	50	250	5 ділянка, 6 точка (рис.3)
3	500	400	50	100	56	106	6 ділянка, 7 точка (рис.3)

Із рисунків 2, 3 і таблиці 1 видно, що зміна довжини магістральної частини струмопроводу (шинопроводу) не впливає на визначення точки приєднання БК, але має вплив на рівень найменших втрат. При збільшенні реактивного навантаження шинопроводу при одних і тих же значеннях потужності БК і рівномірно розподілених навантаженнях точка приєднання зміщується вправо від його початку і навпаки – при зменшенні – вліво, до початку струмопроводу.

Структурна схема алгоритму розрахунку на ПЕОМ відстані до оптимальної точки приєднання БК до струмопроводу (шинопроводу) з використанням системи програмування "Turbo Pascal 7.0" за наведеними математичними моделями (13), (14) показана на рисунку 6.

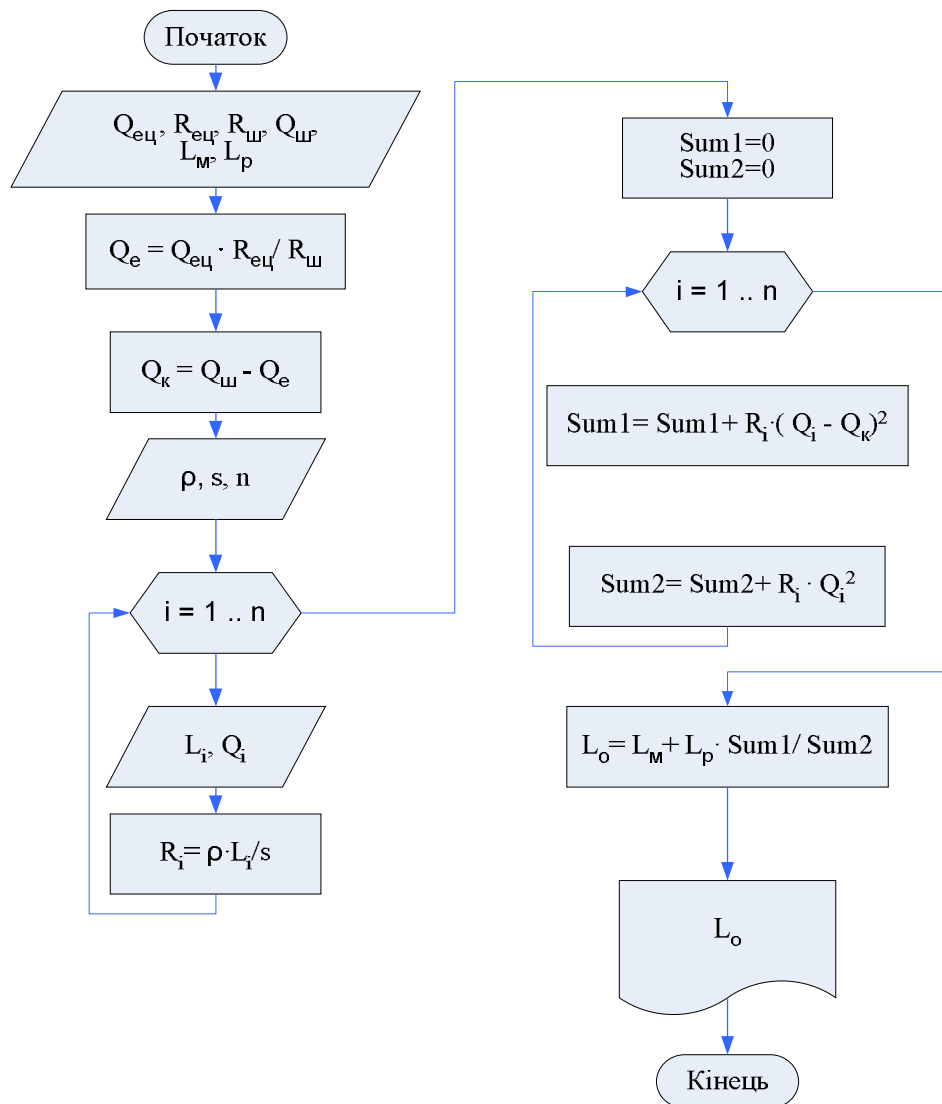


Рис. 6. Структурна схема алгоритму розрахунку відстані від ТП до оптимальної точки приєднання БК

### Висновок

1. Запропоновані математичні моделі для визначення втрат активної потужності в струмопроводах (шинопроводах) в залежності від точки приєднання БК. Це дає можливість визначити точку приєднання, яка є оптимальною.

2. Побудовані структурні схеми алгоритмів розрахунку втрат в струмопроводах (шинопроводах) і визначення точки приєднання БК, яка забезпечує найменші втрати, а також розрахунку відстані від трансформаторної підстанції до цієї точки, на ПЕОМ з використанням системи програмування "Turbo Pascal 7.0" для різних застосувань струмопроводів і шинопроводів.

1. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами [Електронний ресурс] / Нормативний документ Міністерства палива та енергетики України. – (Затверджено Наказ Міністерства палива та енергетики України 17 січня 2002 р. № 19).
2. Економічно доцільні обсяги реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної та споживача (основного споживача та субспоживача). Методика визначення. – К.: "Укрсільенергопроект". – Інформаційний збірник: "Розподільчі електромережі". – 2003. - №4. – с.12 – 16.