

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

П. Д. Лежнюк, О. М. Нанака

**ФОРМУВАННЯ УМОВ ОПТИМАЛЬНОСТІ
КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ
І ЕНЕРГОПОСТАЧАЛЬНИХ КОМПАНІЙ**

Вінниця
ВНТУ
2015

УДК 621.316.1 621.3.076.1 : 621.311

ББК 31.279-022.85

Л40

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 30.04.2015 р.)

Рецензенти:

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

Ю. Л. Саєнко, доктор технічних наук, професор

Лежнюк, П. Д.

Л40 Формування умов оптимальності компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній : монографія / П. Д. Лежнюк, О. М. Нанака. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 148 с.

ISBN 978-966-641-639-4

У монографії розглянуто методи визначення втрат активної електроенергії від перетікання реактивної в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній, що дозволяє сформулювати умови оптимальної компенсації реактивної потужності.

Монографія розрахована на фахівців в галузі компенсації реактивної потужності та фахівців в питаннях взаєморозрахунків за перетоки реактивної потужності.

УДК 621.316.1 621.3.076.1 : 621.311

ББК 31.279-022.85

ISBN 978-966-641-639-4

© П. Лежнюк, О. Нанака, 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРИ РОЗРАХУНКУ ЕКОНОМІЧНИХ ЕКВІВАЛЕНТІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ВХІДНИХ РЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	9
1.1 Методи визначення втрат активної потужності при розрахунку економічних еквівалентів реактивної потужності.....	9
1.2 Метод розрахунку вхідних реактивних потужностей для споживачів	16
1.3 Шкали, системи і методики стимулювання впровадження компенсації реактивної потужності	18
Висновки до розділу 1	29
2 ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ І ЕКОНОМІЧНИХ ЕКВІВАЛЕНТІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІД ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	31
2.1 Економічні еквіваленти реактивної потужності для вузлів замкнених мереж регіональних енергосистем	33
2.2 Економічні еквіваленти реактивної потужності для розімкнених мереж обласних енергопостачальних компаній (обленерго).....	37
2.3 Економічні еквіваленти реактивної потужності для генераторів електростанцій, малих ГЕС, когенераційних установок і ТЕЦ промислових підприємств.....	44
2.4 Економічні еквіваленти реактивної потужності для мереж споживачів.....	45
2.5 Порівняльний аналіз розрахунку економічних еквівалентів реактивної потужності.....	46
2.6 Використання методу визначення економічних еквівалентів реактивної потужності для визначення черговості впровадження компенсувальних установок	51

2.7 Використання методу визначення економічних еквівалентів реактивної потужності для розробки способу і системи керування компенсвальними установками за критерієм мінімуму втрат	52
Висновки до розділу 2	56
3 ВИЗНАЧЕННЯ ВХІДНИХ РЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ	
3 МЕТОЮ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ.....	57
3.1 Вимоги до розрахунку вхідних реактивних потужностей з метою регулювання напруги	57
3.2 Принципи, положення і припущення, покладені в основу розрахунку вхідних реактивних потужностей	58
3.3 Метод визначення вхідних реактивних потужностей з метою регулювання напруги	59
3.4 Відшкодування збитків споживачам від збільшення втрат активної енергії в їх мережах у випадку залучення їх до регулювання напруги в загальносистемних інтересах.....	63
Висновки до розділу 3	64
4 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ МІЖ ЕНЕРГОПОСТАЧАЛЬНИМИ КОМПАНІЯМИ І СПОЖИВАЧАМИ ТА МІЖ СУБ'ЄКТАМИ ОПТОВОГО РИНКУ І ЕФЕКТИВНОСТІ ЗНИЖЕННЯ СПОЖИВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ...	65
4.1 Метод визначення втрат активної електроенергії від перетікання реактивної енергії між енергопостачальними компаніями та споживачами	66
4.2 Метод визначення додаткових втрат електроенергії і їх вартості в умовах недостатнього оснащення електричних мереж споживачів компенсвальними установками і невикористання оптимізації залишкових перетоків.....	74
4.3 Визначення втрат і їх вартості в «особливих» ситуаціях споживання реактивної електроенергії.....	81
4.4 Визначення втрат і їх вартості від перетікання реактивної електроенергії між генеруючими компаніями і їх споживачами, регіональними енергосистемами, енергопостачальними компаніями і споживачами, які живляться від генераторної напруги	87

4.5 Метод визначення втрат в мережах обленерго при приєднанні до них малих ГЕС, когенераційних установок, підприємств, в складі яких є ТЕЦ	88
4.6 Метод визначення зниження втрат в мережах енергопостачальних компаній при встановленні компенсувальних установок в мережах споживача	91
4.7 Визначення ефективності зменшення споживання реактивної енергії з мережі енергопостачальної компанії	93
Висновки до розділу 4	98
ПІДСУМКИ	99
ЛІТЕРАТУРА	100
ДОДАТОК А.....	110
ДОДАТОК Б	131

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- БК – батарея конденсаторів
ВВП – валовий внутрішній продукт
ВРП – вхідна реактивна потужність
ГЕС – гідроелектростанція
ГПП – головна понижувальна підстанція
ДКЕ – договір на користування електроенергією
ДПЕ – договір на постачання електроенергії
ДРП – джерело реактивної потужності
ЕЕРП – економічний еквівалент реактивної потужності
ЕК – енергопостачальна компанія
КРП – компенсація реактивної потужності
КУ – компенсувальна установка
ЛЕП – лінія електропередачі
НКРЕ – Національна комісія регулювання електроенергетики України
НН – низька напруга (обмотка НН – вторинна обмотка понижувального трансформатора)
ОРЕ – оптовий ринок електроенергії
РЕМ – районі електромережі
РП – розподільний пункт
РПН – регулювання під навантаженням
СГ – синхронний генератор
СД – синхронний двигун
СК – синхронний компенсатор
ТЕЦ – теплоелектроцентраль
ТП – трансформаторна підстанція
ЦРП – центральний розподільний пристрій

*Світлій пам'яті
Рогальського Броніслава
Станіславовича
присвячується*

ВСТУП

Як відомо, передача реактивної електроенергії по електричних мережах зумовлює в них втрати активної потужності. Але реактивну електроенергію, на відміну від активної, можна виробляти безпосередньо біля споживача реактивної енергії, цим самим зменшуючи втрати в мережі від її передачі [1]. Тому компенсація реактивної потужності (КРП) і регулювання реактивних перетікань в електромережах є визнаними ефективними технологіями енергозбереження та забезпечення належної якості напруги.

Актуальність компенсації реактивної потужності зросла після введення в дію нормативного документа «Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між енергопостачальною організацією та її споживачами». Основне її призначення – стимулювання підвищення рівня КРП і зниження технологічних втрат електроенергії в електричних мережах. Але аналіз результатів впровадження вищевказаного нормативного документа в мережах споживачів і обласних енергопостачальних компаній (ЕК) за даними НЕК «Укренерго» [2] показує, що її вплив на споживачів незначний, а на суб'єктів оптового ринку електроенергії (ОРЕ) – практично відсутній.

Актуальність цієї проблеми також підтверджується і тим, що на координаційній нараді Мінпаливенерго від 27.11.2007 р. прийнято рішення про розроблення нової редакції «Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами».

В чинних нормативних документах відсутнє формування умов оптимальної КРП, що унеможлиблює досягнення найбільшого ефекту зниження втрат. Формування умов оптимальної КРП базується на визначенні втрат і економічних еквівалентів реактивної потужності (ЕЕРП), але їх визначення за використанням відомих методів призводить до суттєвих похибок, що неприйнятно для розрахунку плати за реактивну електроенергію, відсутні механізми стимулювання споживачів до регулювання напруги та впровадження оптимальної КРП.

Виходячи з цього, можна виділити низку важливих аспектів, які на сьогодні є недостатньо дослідженими:

– аналіз методів визначення втрат в електричних мережах з метою визначення економічних еквівалентів реактивної потужності та умов оптимальної КРП;

- розроблення методу розрахунку втрат і економічних еквівалентів реактивної потужності та визначення вхідної реактивної потужності (ВРП) з метою нормалізації рівнів напруги у вузлах електричних мереж;
- розроблення методів визначення втрат від перетікання реактивної енергії між ЕК та їх споживачами і суб'єктами оптового ринку електроенергії, що дозволить сформулювати умови оптимальної компенсації реактивної потужності та вдосконалення методу визначення втрат активної потужності в «особливих» (нетипових) ситуаціях споживання реактивної електроенергії;
- розроблення методу визначення додаткових втрат електроенергії в умовах недостатнього оснащення електричних мереж споживачів компенсувальними установками і невикористання оптимізації залишкових перетікань;
- розроблення математичної моделі для визначення втрат від перетікання реактивної енергії між енергопостачальними компаніями і споживачами з метою відшкодування збитків споживачів при встановленні в їх мережах додаткових компенсувальних установок (КУ) в загальносистемних інтересах і регулювання напруги;
- розроблення способу і системи автоматичного керування КУ за критерієм мінімальних втрат активної потужності від перетікання реактивної потужності;
- вдосконалення «Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами» на підставі розроблених і вдосконалених методів визначення втрат електроенергії від перетікання реактивної потужності в електричних мережах ЕК і споживачів та формування умов оптимальності КРП.

Дослідження та реалізація методу керування перетіканнями реактивної енергії дозволить знизити втрати електроенергії в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній та покращити якість напруги, а також дасть можливість вдосконалити існуючу «Методику обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами».

Механізм збалансування інтересів енергопостачальних компаній та споживачів при встановленні в мережах останніх додаткових КУ в загальносистемних інтересах, а також спосіб та систему автоматичного керування КУ за критерієм мінімуму втрат дозволить підвищити обґрунтованість для споживачів електроенергії та суб'єктів оптового ринку доцільності впровадження ними оптимальної компенсації реактивної потужності, і, як наслідок, забезпечить додаткове зниження технологічних втрат електроенергії в мережах споживачів та енергопостачальних компаній в межах 3–5 %.

Метою роботи є зниження втрат електроенергії в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній шляхом розроблення та вдосконалення методів керування перетіканнями реактивної енергії.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРИ РОЗРАХУНКУ ЕКОНОМІЧНИХ ЕКВІВАЛЕНТІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ВХІДНИХ РЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Методи визначення втрат активної потужності при розрахунку економічних еквівалентів реактивної потужності

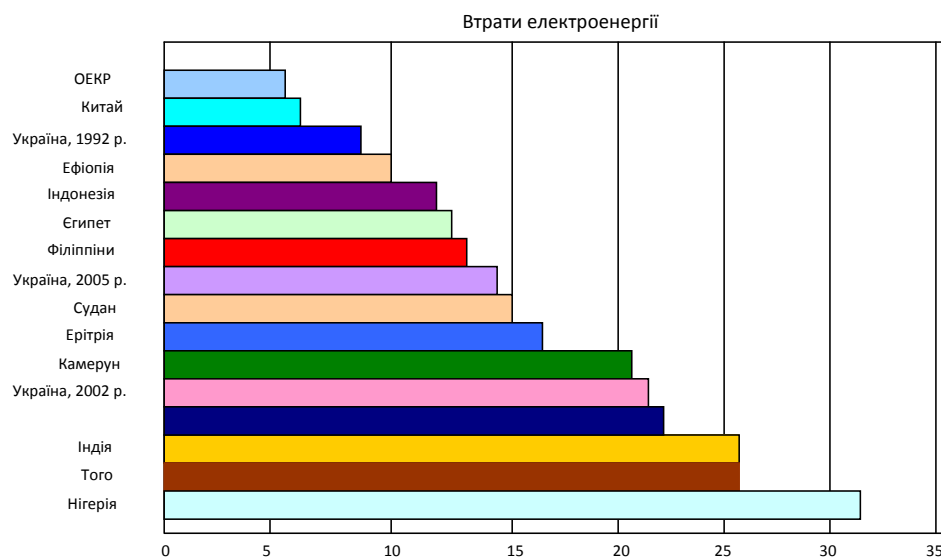
Проблема мінімізації втрат активної потужності (енергії) виникла одразу ж після організації енергосистеми і до теперішнього часу є найважливішою та найактуальнішою задачею для науковців. Актуальність цієї проблеми посилюється в країнах з обмеженими енергоресурсами (до таких країн можна віднести Україну, яка за рахунок своїх енергоресурсів задовольняє близько 50 % потреб в енергоносіях). Ця проблема набуває надзвичайну актуальність в умовах, коли ціна імпортованих енергоносіїв перевищує прийнятні для економіки країни межі, і майже відсутня альтернатива енергозбереженню [3].

За останні роки в Україні розроблено низку нормативно-правових документів, які регламентують використання електроенергії, серед яких: «Закон України про енергозбереження», «Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами», «Закон України про електроенергетику», «Тарифи на активну електроенергію», «Правила користування електричною енергією». Створені державні структури з енергозбереження, низка державних стандартів щодо енерго- і ресурсовикористання [4]. ВВП з 2000 року почав зменшуватись. Але це зменшення більшою мірою зумовлено зменшенням обсягів виробництва, ніж впровадженням енергозберігаючих технологій. Питома енергоємність одиниці ВВП в нашій країні у 3–4 рази перевищує аналогічні показники високорозвинутих країн. Не краща ситуація склалась в електроенергетиці. Технологічні втрати активної електроенергії разом з так званими «комерційними втратами» у 2005 році склали 14,7 % при нормативних технологічних втратах 13,9 %. Зазначимо, що ці втрати у 1,82 рази більші фактичних втрат електроенергії в мережах енергосистем колишнього СРСР (1990 р.) [5], а останні – в 1,5–2 рази більші за аналогічні показники західних країн. Місце України по втратах елект-

роенергії серед інших країн світу наочно видно з наведеної діаграми (рис. 1.1) [6].

Непомірно значні втрати електроенергії (12–16 % [7]) зумовлені, в основному, такими причинами:

- низьким рівнем КРП;
- нерівномірністю графіків електричних навантажень; відсутністю технічних засобів оптимального (за критерієм мінімальних втрат електроенергії) керування компенсувальними установками і добовими графіками електричних навантажень споживачів з метою їх вирівнювання;
- невикористанням регуляторів РПН на вузлових підстанціях ЕК (через їх ненадійність і значну вартість) [3].



ОЕКР – країни, що об'єдналися в організацію з економічної кооперації та розвитку

(США, Канада, країни ЄС, Японія та інші)

Рисунок 1.1 – Технологічні втрати електроенергії в електричних мережах України в порівнянні з іншими країнами світу

Відомо, що компенсація реактивних навантажень (КРП) є однією з найбільш ефективних енергозберігаючих технологій в електричних мережах споживачів та ЕК. Із всіх можливих заходів з енергозбереження в електричних мережах близько 80 % ефекту (зниження технологічних втрат електроенергії) приходить на КРП [8].

Цільову функцію задачі КРП можна представити як:

$$\min \Delta P(Q_i) \tag{1.1}$$

де ΔP – технологічні втрати активної потужності у відповідній електромережі в характерному режимі; Q_i – перетікання реактивної потужності в i -й точці мережі.

Задача КРП, а саме оптимізація перетікань реактивної потужності, була висвітлена у публікаціях І. М. Марковича, Ю. С. Железко, В. А. Венікова, В. Г. Холмського, Н. А. Мельникова, В. І. Ідельчика, В. Г. Журавльова [9–15] та багатьох інших радянських вчених.

Відомо, що мінімізацію функції (1.1) можна представити як

$$\text{grad} \Delta P(Q_i) = [\partial \Delta P / \partial Q_i], \quad (1.2)$$

де $\partial \Delta P / \partial Q_i$ – часткові похідні від цільової функції по перетіканням реактивної потужності в i -ому вузлі мережі.

Ці часткові похідні стали основою класичних методів оптимізації реактивних перетікань [9, 16, 17] та використовувались вченими (А. М. Зельцбург, Г. Ю. Поспелова, В. М. Сіньков) при написанні наукових статей. В вузівських підручниках ця величина формулювалася як швидкість зміни втрат ΔP при зміні Q або коефіцієнтом зміни втрат активної потужності при зміні реактивної потужності [18].

Прийнявши за основу роботу О. Т. Гераскіна [19], який фундаментально досліджував метод точного чисельного розрахунку похідних $d\Delta P / dQ_i$, авторський колектив (Є. Л. Арбузов, Д. Б. Банін, М. Д. Банін, А. Д. Голота та ін.) «Технологічних умов впровадження та використання методики розрахунків плати за перетікання реактивної електроенергії між енергопостачальною організацією та її споживачами» [20] надає частковим похідним $\partial \Delta P / \partial Q_i$ термін – «економічний еквівалент реактивної потужності» і пропонує математичні основи їх розрахунку.

Числове значення ЕЕРП в характерному електричному режимі для конкретного вузла електричної мережі визначається як часткова похідна від сумарних втрат активної потужності по реактивній потужності цього вузла. Оскільки електричні мережі від джерел живлення до споживачів розподіляють на магістральні замкнені мережі 750–220 кВ та розподільні розімкнені мережі 110–10 кВ, то і значення ЕЕРП також розподіляють на дві складові [20]:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_K} = \frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_K} + \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_K} = D_1 + D_2 = D, \quad (1.3)$$

де ΔP_1 , ΔP_2 – складові втрати у виділених частинах схеми; Q_k – реактивна потужність конкретного вузла; D_1 , D_2 – складові ЕЕРП для цього вузла.

Розрахунок D_1 здійснюється методом числового диференціювання з допомогою програми Z – режим (компонента базового комп'ютерного комплексу методики). Вручну перевірити правильність розрахунків D_1 неможливо.

Розрахунок D_2 здійснюється в базовому комп'ютерному комплексі аналогічно розрахунку D_1 за схемами радіусів живлення споживача.

Розрахунок ЕЕРП може бути здійснений і вручну.

В [20] розглянуто метод чисельного диференціювання з урахуванням параметрів і режимних характеристик електричних мереж. Для прикладу розглядається тривіальний радіус (рис. 1.2).

Тривіальним радіусом мережі вважається мережа, яка складається тільки з двох вузлів (балансуючого та вузла навантаження), які зв'язані між собою лінією з комплексними опорами.

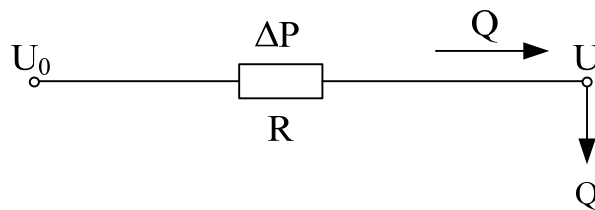


Рисунок 1.2 – Тривіальний радіус-ланка електричної мережі

У цьому випадку втрати ΔP визначаються за формулою

$$\Delta P = \frac{10^{-3}}{U^2} \cdot Q^2 \cdot R. \quad (1.4)$$

Значення ЕЕРП дорівнює:

$$D = \frac{\partial \Delta P}{\partial Q} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{U^2} \cdot Q \cdot R, \quad (1.5)$$

де ΔP – втрати активної потужності від передачі по мережі реактивної потужності, Вт; U – рівень напруги на ввіді споживача, кВ; R – активний опір радіуса живлення споживача, Ом.

За формулою (1.5) визначається швидкість зміни втрат активної потужності при зміні реактивної потужності.

Методи точного чисельного розрахунку ЕЕРП пройшли певні дослідження і дали точну розрахункову формулу.

Спочатку визначали похідну $d\Delta P / dQ$. Враховуючи те, що напруга є функцією від навантаження $U = f(U_o, P, Q)$, то продиференціювавши $\Delta P = R \cdot (P^2 + Q^2) / U^2$, отримали [20]:

$$\frac{d\Delta P}{dQ} = \frac{\partial \Delta P}{\partial Q} + \frac{\partial \Delta P}{\partial U} \cdot \frac{\partial U}{\partial Q}, \quad (1.6)$$

$$\text{де } \frac{\partial \Delta P}{\partial Q} = \frac{2 \cdot R \cdot Q}{U^2}; \quad \frac{\partial \Delta P}{\partial U} = \frac{2 \cdot \Delta P}{U}.$$

Значення часткової похідної $\frac{\partial U}{\partial Q}$ можна визначити з рівняння

$$\dot{U} = \dot{U}_o - Z \cdot \frac{\dot{S}}{U}. \quad (1.7)$$

Привівши вираз (1.7) до складових $P, Q, Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ та модулів напруг U_o, U , отримали:

$$F = U^4 + 2 \cdot U^2 \cdot P \cdot R + 2 \cdot U^2 \cdot Q \cdot X + Z^2 \cdot P^2 + Z^2 \cdot Q^2 - U_o^2 \cdot U^2 = 0. \quad (1.8)$$

Продиференціювавши функцію F, отримали значення часткової похідної:

$$\frac{\partial U}{\partial Q} = - \frac{\frac{\partial F}{\partial Q}}{\frac{\partial F}{\partial U}}, \quad (1.9)$$

$$\text{де } \frac{\partial F}{\partial Q} = 2 \cdot U^2 \cdot X + 2 \cdot Z^2 \cdot Q;$$

$$\frac{\partial F}{\partial U} = 4 \cdot U^3 + 4 \cdot U \cdot P \cdot R + 4 \cdot U \cdot Q \cdot X - 2 \cdot U_o^2 \cdot U.$$

Підставивши ці складові у (1.6), отримали точну формулу розрахунку ЕЕРП для тривіального радіуса [20]:

$$D = \frac{2 \cdot R}{U^2} \cdot Q + \frac{2 \cdot \Delta P \cdot (U^2 \cdot X + Z^2 \cdot Q)}{U^2 \cdot (2 \cdot U^2 + 2 \cdot (P \cdot Q + Q \cdot X) - U_o^2)}. \quad (1.10)$$

ЕЕРП для складних мереж розраховують за допомогою матричної формули, виведення якої здійснено у роботі [19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta S}{\partial Q_i} = j \{ & 1_j - U'_n \cdot 1_j \cdot U_D^{-1} - U'_n \cdot S_j \cdot U_D^{-2} \cdot (1_D - Z \cdot U_D^{-2} \cdot S_n \cdot Z \cdot U_o^{-2} \cdot S_n) \times \\ & \times Z \cdot U_D^{-1} \cdot (1_D + U_D^{-1} \cdot S_n \cdot Z \cdot U_o^{-1}) \}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Безпосереднє значення ЕЕРП (D_1, D_2) є складовою формули (1.11):

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial Q} = \frac{\partial \Delta P}{\partial Q} + j \frac{\partial \Delta Q}{\partial Q} = D + j \frac{\partial \Delta Q}{\partial Q}. \quad (1.12)$$

Розрахунок ЕЕРП D_2 також можна здійснювати на основі статистичної обробки режиму характерної електричної мережі. В цьому випадку кожен споживач моделюється аналогічно тривіальному радіусу і значення D_2 визначається за функцією [20]

$$D_{2i} = f(U, R, d_{cm}), \quad (1.13)$$

де U – напруга джерела живлення шини 10(6) кВ підстанції 110/35/10(6) кВ живлячої мережі; R – активний опір, який пропорційний електричній віддаленості споживача від джерела живлення; d_{cm} – відносний економічний еквівалент реактивної потужності, отриманий у результаті обробки характерного для державної акціонерної енергетичної компанії (ДАЕК) фрагменту електричної мережі.

d_{cm} визначається за алгоритмом [20]:

1. Вибирається типова електрична мережа на 200–300 вузлів (ТП, РП), напругою 10(6) кВ. Типовість схеми визначається групою режимів ДАЕК або підприємства електромереж (ПЕМ).

2. Для кожного навантаження схеми визначається точне значення ЕЕРП (D_2). Отримаємо вибірку:

$$d_1, d_2, d_3, \dots, d_i, \dots, d_n, \quad (1.14)$$

де d_i – точне значення ЕЕРП (D_2) для i -ї точки схеми з врахуванням реальних навантажень, конфігурації та режиму.

3. Виключається детермінована функціональна залежність елементів ряду від конфігураційних та параметричних факторів. В результаті отримаємо нову вибірку, в якій зберігається випадковий фактор відхилення навантажень від деякого середнього і взаємодія навантажень:

$$S_1, S_2, S_3, \dots, S_i, \dots, S_n, S_i = d_i / h_i, \quad (1.15)$$

де S_i – відносне значення ЕЕРП (D_2) для i -ї точки схеми; h_i – індивідуальний коефіцієнт i -го вузла, який характеризує його електричну віддаленість і рівень напруги.

4. Отриманий ряд S можна вважати реалізацією випадкової величини, яка має нормальний закон розподілення, тобто характеризується математичним очікуванням (1.16) та середньоквадратичним відхиленням (1.17):

$$M = \frac{1}{n} \cdot \sum S_i ; \quad (1.16)$$

$$G = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum (S_i - M)^2} . \quad (1.17)$$

5. Числове значення для коефіцієнта h можна визначити з формули (1.10):

$$D = \frac{2 \cdot R}{U^2} \cdot \left(Q + \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot \frac{U^2 \cdot X + Z^2 \cdot Q}{U^2 \cdot (2 \cdot U^2 + 2 \cdot (P \cdot R + Q \cdot X) - U_o^2)} \right) = \frac{2 \cdot R}{U^2} \cdot S \quad (1.18)$$

звідки
$$h = \frac{2 \cdot R}{U^2} .$$

6. За відомими значеннями M та G можна отримати ряд реалізації відносних значень ЕЕРП:

$$S^* = M + f \cdot G , \quad (1.19)$$

де f – випадкова величина з математичним очікуванням 0 та дисперсією 1.

При цьому розрахункові значення ЕЕРП (D_2) з врахуванням конфігураційних та параметричних факторів будуть визначатись за формулою

$$d_i^* = S_i^* \cdot h_i. \quad (1.20)$$

7. Вводяться балансні обмеження, необхідні для дотримання рівності плати за реактивну електроенергію в реальній електричній мережі і плати, яка розраховується за розрахунковими значеннями:

- реальна плата пропорційна $\Pi = \sum d_i \cdot Q_i$;
- розрахункова плата пропорційна : $\Pi^* = \sum d_i^* \cdot Q_i$;
- умова балансу:

$$\Pi = \Pi^*. \quad (1.21)$$

Виконавши певні перетворення над формулами (1.16)–(1.21), отримаємо вираз для розрахункового значення ЕЕРП (D_2) для будь-якої точки обліку споживача:

$$d_i^* = h_i \cdot \left(\frac{\sum d_i \cdot Q_i}{\sum h_i \cdot Q_i} \right) = h_i \cdot d_{cm}, \quad (1.22)$$

де h_i – приведена активна електрична віддаленість i -ї точки обліку споживача; d_{cm} – відносний економічний еквівалент реактивної потужності характерної мережі 10(6) кВ.

Згідно з методикою значення ЕЕРП розраховуються або регіональним диспетчерським центром енергосистеми, або конкретною енергозберігаючою організацією без згоди споживачів, для яких цей розрахунок проводиться. При цьому правильність розрахунків ЕЕРП фактично ніхто не контролює і споживач не може перевірити їх достовірність. До того ж не оговорена державна атестація комп'ютерних програм розрахунків ЕЕРП (D) та його складових.

Розглянувши запропоновані в «Методиці...» підходи та математичний апарат для визначення ЕЕРП, можна зробити висновок про те, що вони відрізняються складністю підготовки вихідних даних і неточністю розрахунків. Тому в роботі запропоновано інший підхід щодо сутності ЕЕРП і на його основі більш простий і в той же час більш точний метод його визначення.

1.2 Метод розрахунку вхідних реактивних потужностей для споживачів

Спроби визначити вхідні реактивні потужності (ВРП) з метою регулювання напруги були зроблені «Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ)» [21]. Вхідною реактивною потужністю (ВРП) називається

недокомпенсована реактивна потужність, яка передається від генеруючої компанії до споживача по мережах енергосистеми. В зв'язку з введенням з 1 січня 1991 р. нового преїскуранту № 09–01 «Тарифи на електричну та теплову енергію» [22] змінюється і форма оплати за споживану та генеровану реактивну потужність. Це і привело до необхідності розробки нової «Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях» [21]. Ця інструкція була затверджена «Главгосэнергонадзором и Главэлектросетью Минэнерго СССР» 10 квітня 1990 р. Згідно з цією інструкцією вперше споживачу в договорі на користування електроенергією (ДКЕ) вказувались такі величини, як:

– технічні межі споживання реактивної потужності $Q_{\text{сп}}$ в години великих навантажень електричної мережі або реактивної енергії $W_{Q_{\text{сп}}}$ за місяць в ці ж години, при перевищенні яких енергопостачальна організація не несе відповідальності за падіння напруги в точці обліку електроенергії нижче рівня, встановленого в ДКЕ для годин максимуму навантаження електричної мережі;

– технічні межі генерації реактивної потужності $Q_{\text{г}}$ або реактивної енергії $W_{Q_{\text{г}}}$ в мережу енергосистеми в години малих навантажень електричної мережі, при перевищенні яких енергопостачальна організація не несе відповідальності за підвищення напруги в точці обліку електроенергії вище рівня, встановленого в ДКЕ для годин мінімуму навантаження електричної мережі;

– у випадку необхідності – граничні значення реактивної потужності або реактивної енергії, яка генерується в мережу енергосистеми в години великих навантажень електричної мережі та примусово споживається в часи малих навантажень мережі за місяць.

Основою для розрахунку технічних меж споживання реактивної потужності $Q_{\text{сп}}$ та енергії $W_{Q_{\text{сп}}}$ в години великих навантажень електричної мережі та генерації реактивної потужності $Q_{\text{г}}$ та енергії $W_{Q_{\text{г}}}$ в години малих навантажень електричної мережі є значення коефіцієнтів реактивної потужності в зазначені години – $\text{tg}\varphi_{\text{сп}}$ та $\text{tg}\varphi_{\text{г}}$. В інструкції встановлено два методи розрахунку цих коефіцієнтів: нормативний та оптимізаційний.

Нормативний метод базується на застосуванні нормативних значень $\text{tg}\varphi_{\text{сп.н}}$ та $\text{tg}\varphi_{\text{г.н}}$, встановлених цією інструкцією ($\text{tg}\varphi_{\text{сп.н}} = 0,7$; $\text{tg}\varphi_{\text{г.н}} = 0,1$).

Оптимізаційний метод базується на застосуванні програм розрахунку робочих режимів електричних мереж в години їх великих та малих навантажень та виборі оптимального поєднання цих коефіцієнтів у споживачів, які живляться від різних вузлів мережі [21].

Згідно із запропонованим Ю. С. Железком методом значення технічних меж споживання реактивної потужності і енергії в години великих навантажень електричної мережі та генерації її в мережу енергосистеми в години малих навантажень мережі визначаються за формулами

$$Q_{cn} = \operatorname{tg}\varphi_{cn} \cdot P_{IV}; \quad (1.14)$$

$$W_{Q_{cn}} = \operatorname{tg}\varphi_{cn} \cdot \frac{W_{PIV}}{3}; \quad (1.15)$$

$$Q_z = \operatorname{tg}\varphi_z \cdot P_{IV}; \quad (1.16)$$

$$W_{Q_z} = \operatorname{tg}\varphi_z \cdot \frac{W_{PIV}}{3}, \quad (1.17)$$

де W_{PIV} – електроенергія, яка споживається в IV кварталі; P_{IV} – активне навантаження споживача в години максимуму енергосистеми в IV кварталі [21].

Основним недоліком запропонованого методу є те, що величини Q_{cn} та Q_g визначались не на основі інформації про напругу на шинах вузлових підстанцій енергопостачальних компаній (ЕК), а опосередковано через $\operatorname{tg}\varphi_{cn}$ та $\operatorname{tg}\varphi_g$.

В роботі [23] автор також пропонує підхід для розрахунку потужності компенсуючої установки для регулювання напруги в електричній мережі, що, по суті, і є ВРП для споживача. Але недоліком запропонованого підходу є те, що він не розв'язує задачу для підсистеми в цілому.

1.3 Шкали, системи і методики стимулювання впровадження компенсації реактивної потужності

З моменту організації енергосистем виникли вимоги до зниження технологічних втрат електроенергії в мережах енергосистем [24, 25]. Розв'язання цієї задачі було завжди актуальною проблемою в наукових колах. Перший нормативний документ «Руководящие указания по повышению коэффициента мощности в установках потребителей электрической энергии» був введений в 1961 році і визначав граничні значення коефіцієнта потужності на шинах 6–10 кВ підстанцій споживачів. Ці значення наведені в табл. 1.1 [26].

Таблиця 1.1 – Граничні значення коефіцієнтів потужності

Схема живлення споживача	$\cos \varphi$
Від шин генератора (на генераторній напрузі)	0,85
Від районних мереж 110–220 кВ і від мереж 35 кВ, які живляться від електростанції	0,93
Від мереж 35 кВ, які живляться від районних мереж 110–220 кВ	0,95

Наступним нормативним документом, який би стимулював встановлення компенсувальних установок в мережах споживачів, була шкала «знижок та надбавок» до тарифу на активну електроенергію залежно від «фактичного» середньозваженого коефіцієнта потужності, введена в дію з 1 лютого 1969 року. Шкала була розроблена для промислових та прирівняних до них споживачів. Скидки та надбавки нараховувались і до основної, і до додаткової плати за електроенергію. В наведеній шкалі за нейтральну величину був прийнятий $\cos \varphi = 0,9–0,92$. При нижчих значеннях $\cos \varphi$ споживач платив надбавку до тарифу, і навпаки, при вищих одержував скидку до тарифу. Деякі величини скидок та надбавок наведені в табл. 1.2 [27].

Таблиця 1.2 – Шкала скидок та надбавок до тарифу на електроенергію за коефіцієнт потужності електроустановок

Величина середньозваженого коефіцієнта потужності за місяць	Розмір скидки з тарифу на електроенергію, %	Розмір надбавки до тарифу на електроенергію, %	Величина середньозваженого коефіцієнта потужності за місяць	Розмір скидки з тарифу на електроенергію, %	Розмір надбавки до тарифу на електроенергію, %
1	2	3	4	5	6
1,00	6	–	0,75	–	14,5
1	2	3	4	5	6
0,94	4	–	0,69	–	28,0
0,93	2	–	0,68	–	31,0
0,921	0,2	–	0,67	–	34,0
0,92	–	–	0,66	–	37,0
0,90	–	–	0,64	–	43,0
0,899	–	0,15	0,63	–	46,0
0,89	–	1,5	0,62	–	49,0
0,85	–	3,5	0,58	–	61,0
0,77	–	11,5	0,50 і нижче	–	85,0
0,76	–	13,0			

Наведена шкала мала певні недоліки. По-перше, не були розглянуті режими конкретних електричних мереж. По-друге, приблизно враховується віддаленість споживачів від генераторів. По-третє, середньозважений $\cos \varphi$ не зовсім об'єктивно відображає споживання реактивної потужності через низку причини:

– $\cos\varphi = f(P, Q)$, підключення чисто активного навантаження створює ілюзію підключення додаткових КУ;

– цей коефіцієнт не зовсім точно відображає процес компенсації реактивної потужності, оскільки в області високих значень $\cos\varphi$ значні зміни реактивного навантаження приводять до незначних змін $\cos\varphi$.

Як показав огляд міжнародних ринків реактивної потужності, плата за реактивну потужність та електроенергію в країнах Латинської Америки, Європи (Великобританія, Швеція, Нідерланди), США, Канаді, Японії, Росії, Індії до сьогодні здійснюється за аналогічним принципом знижок і надбавок в залежності від «фактичного» середньозваженого коефіцієнта потужності [25, 28, 29].

З метою усунення перерахованих недоліків, з 1-го липня 1974 року вводяться в дію «Указання по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях» [30], шкала знижок і надбавок до тарифу на електроенергію за компенсацію реактивної потужності. Величина знижок та надбавок нараховувалась залежно від величини $tg\varphi_\phi$ та $tg\varphi_{opt}$, які задані в табл. 1.3 (наведено фрагмент таблиці) та визначаються як [27]

$$tg\varphi_\phi = \frac{Q_\phi}{P_M}; \quad tg\varphi_{opt} = \frac{Q_{opt}}{P_M}, \quad (1.18)$$

де Q_{opt} – оптимальне значення вхідної реактивної потужності, задане енергосистемою; Q_ϕ – фактичне значення вхідної реактивної потужності.

З табл. 1.3 видно, що при $tg\varphi_\phi = tg\varphi_{opt}$ знижка досягає максимального значення.

Але й ця шкала не була позбавлена недоліків. В ній не були чітко сформульовані вимоги до КРП у мережах підприємства; не враховувалась можливість встановлення регуляторів КУ; віддаленість споживачів від джерел живлення враховувалась досить наближено; інтереси споживачів не були враховані.

У 80-х роках був розроблений новий підхід до проблеми компенсації реактивних навантажень [31]. Згідно з цим підходом визначались розрахункові значення «економічних реактивних потужностей» для періоду максимуму активного навантаження енергосистеми (Q_{e1}) та для періоду нічного провалу енергосистеми (Q_{e2}). Розрахунок плати за перетікання реактивної потужності виконувався за відхиленнями від цих розрахункових значень. Якщо значення фактично спожитої реактивної потужності було меншим заданого, то нараховувалась скидка до плати за електроенергію, а якщо більшим – нараховувалась надбавка. Значення економічних реактивних потужностей повинні були визначатись на основі оптимізації усталених режимів по реактивній потужності (критерій мінімуму активних втрат) у живильних і розподільчих електричних мережах 110/35/10 (6) кВ. Але розробники такого підходу не врахували те, що в 1983–1991 рр. ні технічно, ні інформаційно виконати поставлені вимоги було неможливо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях / Н. А. Мельников. – М. : Энергия, 1975.
2. Встановлена потужність компенсувальних установок та зміна рівня компенсації реактивної електроенергії за 1997–2003 рр. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish>.
3. Концепція компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній / [Б. С. Рогальський, О. М. Нанака, А. В. Праховник і ін.] // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2006. – № 3. – С. 4–15.
4. Ковалко М. П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк ; відпов. ред. А. К. Шидловський. – К. : УЕЗ, 1998. – 506 с.
5. Утіліч Ю. Сучасний стан електроенергетики України. Шляхи підвищення ефективності роботи енергетичної галузі / Ю. Утіліч // Виклад доповідей 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Управління енерговикористанням», м. Львів, 03–06 червня 1997 р. – 1997. – С. 7.
6. World Energy Outlook / IEA Publications. – Printed in France by Louis-Jean 05003 G&P, November.
7. Шербина Ю. В. Экономическое управление компенсацией реактивных мощностей в электрических сетях потребителей электроэнергии в современных условиях / Ю. В. Шербина, А. Д. Голота, М. А. Миронов // Энергетика и электрификация. – 1993. – № 3. – С. 39–42.
8. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
9. Веников В. А. Электрические станции, сети и системы. Методы оптимизации управления планированием больших систем энергетики, т. 7. / В. А. Веников, В. И. Идельчик. – М. : ВИНТИ, 1974. – 208 с.
10. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю. С. Железко. – М. : Энергоиздат, 1981. – 200 с.
11. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) / В. Г. Холмский. – М. : Высшая школа, 1975. – 280 с.

12. Мелников Н. А. Электрические сети и системы : учеб. пособ. для вузов / Н. А. Мелников. – Изд. 2-е. – М. : Энергия, 1975. – 464 с.
13. Маркович И. М. Энергетические системы и их режимы / И. М. Маркович. – М. : Госэнергоиздат, 1952. – 312 с.
14. Холмский В. Г. Комплексная программа расчетов режимов электрических сетей и оптимизация распределения реактивных мощностей с помощью ЭЦВМ / В. Г. Холмский, Ю. В. Щербина // Энергетика и электротехническая промышленность. – 1963. – № 3. – С. 58–61.
15. Железко Ю. С. Методика определения оптимального значения реактивной мощности, передаваемой потребителю / Ю. С. Железко // Промышленная энергетика. – 1977. – № 1. – С. 49–51.
16. Зельцбург А. М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / А. М. Зельцбург. – М. : Высшая школа, 1973. – 272 с.
17. Экономические режимы работы подстанций 35/10 кВ с двумя трансформаторами различной мощности / [И. П. Притыка, В. М. Синьков и др.] // Энергетика и электрификация. – 1982. – № 2. – С. 25–27.
18. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / под. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. – М. : Энергия, 1973. – 520 с.
19. Гераскин О. Г. Матричные формулы для определения производных от потерь мощности по активным и реактивным мощностям узлов электрической сети / О. Г. Гераскин // Известия Вузов СССР. – Энергетика, 1981. – № 8. – С. 3–8.
20. Технологічні умови впровадження та використання методики розрахунків плати за перетоки реактивної енергії між енергопостачальною організацією та її споживачами (базовий цикл впровадження) / [С. Л. Арбузов, Д. Б. Банін, М. Д. Банін та ін.] // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 1999. – Вип. 4. – 80 с.
21. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Промышленная энергетика. – 1990. – № 7. – С. 50–55.
22. Прейскурант № 09-01. Тарифы на электрическую и тепловую энергию. – М. : Прейскурантиздат, 1990.
23. Лыкин А. В. Электрические системы и сети : учеб. пособ. / А. В. Лыкин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 248 с.
24. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
25. Miller T. J. E. Reactive Power Control in Electric System / T. J. E. Miller. – A Wiley- Interscience Publication. New York USA, 1982. – P. 382.

26. Руководящие указания по повышению коэффициента мощности в установках потребителей электрической энергии. – Госэнергоиздат, 1961 г.

27. Демов О. Д. Планування електроспоживання промислових підприємств та управління ним : монографія / О. Д. Демов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2001. – 104 с. – ISBN 966-641-025-7.

28. Voltage Regulation with Distributed Energy Resources (DER) / [John D. Kueck, Brendan J. Kirby, Leon M. Tolbert and D. Tom Rizy] // Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. «Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption» Staff Report Docket № ADO5-1-000 February 4, 2005.

29. Приказ о порядке расчета значений соотношения активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения) // Приказ Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации от 22 февраля 2007 г. № 49.

30. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. – М. : Энергия, 1974.

31. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях. – В кн. : Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. – М. : Энергоатомиздат, 1986.

32. Железко Ю. С. О новых правилах оплаты за реактивную энергию, потребляемую и генерируемую потребителями / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев // Промышленная энергетика. – 1990. – № 7. – С. 43–46.

33. Железко Ю. С. Стоимость реактивной мощности и энергии / Ю. С. Железко // Электрические станции. – 1989. – № 9.

34. Инструкция по расчету и применению скидок к тарифам на активную электрическую мощность и энергию и генерацию реактивной мощности и энергию [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.askue.energobyт.by/askue20.html>

35. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. Ч. I : навч. посіб. / Б. С. Рогальський. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 119 с.

36. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами / Офіційний вісник України. – 2002. – № 6.

37. Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між електропостачальною організацією та її споживачами / Офіційний вісник України. – 1998. – № 1.

38. Щербина Ю. В. Экономическое управление компенсацией реактивных мощностей в электрических сетях потребителей в современных условиях / Ю. В. Щербина, А. Д. Голота, М. А. Миронов // Энергетика и электрификация. – 1993. – № 2. – С. 36–40.

39. Новая методика расчета платы за перетоки реактивной электроэнергии между энергоснабжающей организацией и ее потребителями / [Ю. В. Щербина, Д. Б. Банин, А. Д. Голота и др.] // Энергетика и электрификация. – 1997. – № 4. – С. 49–52.

40. Роз'яснення до Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між енергопередавальною організацією та її споживачами. – К. : Інформаційний бюлетень НКРЕ. – № 2. – 2003. – С. 192.

41. Владимиров Ю. В. О методике расчетов оплаты за перетоки реактивной электроэнергии между энергоснабжающей организацией и потребителями / Ю. В. Владимиров, И. И. Смилянский // Энергетика и Электрификация. – 2002. – № 11. – С. 31–34.

42. Зорин В. В. К вопросу об оплате за реактивную электрическую энергию / В. В. Зорин // Техническая электродинамика. – 2004. – № 1. – С. 68–72.

43. Спосіб і пристрій автоматичного керування конденсаторними батареями / [Л. Н. Добровольська, І. В. Вітг, О. М. Нанака, І. П. Чайка] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 7–10.

44. Соломчак О. В. Пропозиції щодо вдосконалення «Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії» / О. В. Соломчак // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 4. – С. 56–59.

45. Зорин В. В. Об оплате за перетоки реактивной мощности в условиях рыночных отношений / В. В. Зорин, В. В. Зорин // Техническая электродинамика. – 2004. – № 2. – С. 58–62.

46. Владимиров Ю. В. О проблемах компенсации реактивной мощности в сетях потребителей / Ю. В. Владимиров, Т. А. Крамская // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств : V міжнародна науково-технічна конф. : зб. праць. – Маріуполь : Вид-во ПДТУ, 2005. – С. 275–277.

47. Владимиров Ю. В. О концепции компенсации реактивной мощности / Ю. В. Владимиров // Світлотехніка та електроенергетика, 2008. – № 3. – С. 35–40.

48. Комплексне і системне вирішення проблеми компенсації реактивних навантажень в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній / [А. В. Праховник, В. М. Божко, Б. С. Рогальський, О. М. Нанака] // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 2. – С. 2–9.

49. Рогальський Б. С. Нові підходи до визначення плати за реактивну енергію і потужність / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2005. – Т. 2. – Вип. 37. – С. 14–19.

50. Закон України «Об энергосбережении» Промышленность Украины : путь к энергетической эффективности. ЕС / Energi Centre. Ukraine (Программа Tacis). – 1995.

51. Рогальський Б. С. Методи поетапного розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем і споживачів / Б. С. Рогальський // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2001. – Вип. 1. – С. 22–39.

52. Рогальський Б. С. Система розрахунків за реактивну енергію і стимулювання інвестицій в енергозбереження в електроенергетиці / Б. С. Рогальський, Л. М. Бурбело, О. М. Нанака // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «НАУКА І ОСВІТА 2003» Дніпропетровськ–Донецьк–Харків. – Т. 22. – Економіка. – С. 41–44.

53. Зорин В. В. Концепция компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях / В. В. Зорин // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2005. – № 3. – С. 24–26.

54. Рогальський Б. С. Про використання економічних еквівалентів реактивної потужності для визначення плати за перетікання реактивної електроенергії між енергопостачальними компаніями і їх споживачами / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 4. – С. 44–51.

55. Рогальський Б. С. Економічні еквіваленти реактивної потужності (ЕЕРП) та їх використання / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 126–129.

56. Рогальський Б. С. Економічні еквіваленти реактивної потужності (ЕЕРП) та їх використання / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Контроль і управління в складних системах (КУСС – 2005). Тези доповідей восьмої міжнародної науково-технічної конференції м. Вінниця, 24–27 жовтня 2005 року. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – С. 156.

57. Сиуда И. П. Алгоритм расчета мощности компенсирующих устройств в сетях электроэнергетических систем / И. П. Сиуда, В. И. Свешников // Энергетика и транспорт. – 1978. – № 4. – С. 148–152.

58. Рогальський Б. С. Метод визначення економічних еквівалентів реактивної потужності для замкнених мереж / Б. С. Рогальський, Є. А. Штогрін, О. М. Нанака // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2006. – № 2. – С. 66–70.

59. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей / Н. А. Мельников. – М. : Энергия, 1972. – 232 с.

60. Рогальський Б. С. Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами / Б. С. Рогальський, Л. М. Мельничук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 1. – С. 38–41.

61. Лежнюк П. Д. Использование подпрограмм-функций для представления схем электрических сетей при расчетах на ЭВМ / П. Д. Лежнюк, В. И. Нагул // Известия Вузов СССР. Энергетика. – 1981. – № 5. – С. 40–45.

62. Степлюк М. О. Матриця шляхів: алгоритм побудови та застосування / М. О. Степлюк, Б. С. Рогальський, І. П. Сосенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 69–72.

63. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Ф. Ф. Карпов. – М. : Энергия, 1975. – 182 с.

64. Рогальський Б. С. Методика взаєморозрахунків за реактивну електроенергію між малими ГЕС і суб'єктами оптового ринку електроенергії України / Б. С. Рогальський, О. М. Нанак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 2. – С. 61–64.

65. Демов О. Д. Поетапне впровадження конденсаторних установок в електричні мережі промислових підприємств / О. Д. Демов, Хінді Айман Тахер // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 2. – С. 35–39.

66. А. с. 1259237 СССР, МКИ G 05 F 1/70. Автоматический регулятор конденсаторных батарей / Б. С. Рогальский, В. М. Непейвода, А. Д. Демов и А. В. Дмитраш (СССР). – № 3884161/24-07; заявл. 15.04.85; опубл. 23.09.86, Бюл. № 35.

67. А. с. 1416961 СССР, МКИ G 05 F 1/70. Автоматический регулятор конденсаторных батарей / Б. С. Рогальский, А. В. Дмитраш, В. М. Непейвода и А. Д. Демов, (СССР). – № 4100350/24-07; заявл. 11.08.86; опубл. 15.08.88, Бюл. № 30.

68. Деклараційний патент 36292 А Україна, МПК G 05 F 1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних батарей / Рогальський Б. С., Непейвода В. М., Вознюк С. І.; заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № 99116486; заявл. 30.11.1999; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3, 2001 р.

69. А. с. 1260930 СССР, МКИ G 05 F 1/70. Автоматический регулятор мощности конденсаторных батарей / Ю. С. Железко, В. Б. Бессмертнов и И. А. Попов, (СССР). – № 3838497/24-07; заявл. 07.01.85; опубл. 30.09.86, Бюл. № 36.

70. Деклараційний патент на корисну модель 48141 Україна. Автоматичний регулятор конденсаторних батарей: Пат. 48141 Україна, МПК (2006) G05F1/70 / Б. С. Рогальський, О. М. Нанак, О. Д. Демов, І. П. Чайка, І. В. Вітт; заявник та патентоутримувач Вінницький наці-

ональний технічний університет. – № u200909016; заявл. 31.08.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.

71. Визначення технічних значень вхідної реактивної потужності для споживачів електроенергії / [Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака, В. В. Вержук] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 5. – С. 58–64.

72. Підвищення ефективності системи розрахунків за реактивну енергію між споживачами і енергопостачальними організаціями / [Б. С. Рогальський, М. П. Свіридов, В. В. Гур'янов, Н. Б. Сосенко] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – № 1. – С. 36–41.

73. Электрическая энергия. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 8 с. – (Межгосударственный стандарт).

74. Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії та реактивну потужність між енергопостачальною організацією та її споживачами і суб'єктами оптового ринку електроенергії / [Б. С. Рогальський, О. М. Нанака, А. В. Праховник і ін.] // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2009. – № 5. – С. 10–20.

75. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів : М-во палива та енергетики України. – [1-ше вид., офіційне]. – Харків : Вид-во «Індустрія», 2007. – 272 с.

76. Про визначення плати за реактивну енергію в особливих ситуаціях / [Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака, О. О. Бірюков] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5. – С. 50–55.

77. Зорин В. В. Об оплате за перетоки реактивной энергии в условиях рыночных отношений / В. В. Зорин // Промислова енергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 4. – С. 22–23.

78. Владимиров Ю. В. Негативное влияние перетоков реактивных мощностей и «реактивная электроэнергия» / Ю. В. Владимиров, Т. А. Крамская // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2005. – № 3. – С. 27–28.

79. Рогальський Б. С. Обґрунтування переходу плати за споживання реактивної електроенергії на плату за реактивну потужність / Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 3. – С. 42–45.

80. Рогальський Б. С. Обґрунтування переходу плати за споживання реактивної електроенергії на плату за споживання реактивної потужності / Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака // Матеріали II-ї міжнародної науково-технічної конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях та системах». – Луцьк, 2008. – С. 125–127.

81. Рогальський Б. С. Про надбавку до плати за реактивну енергію за недостатнє оснащення мереж споживача засобами компенсації реактивної потужності / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 5. – С. 41–44.

82. Способи та технічні засоби керування компенсувальними установками нового технічного рівня / [Б. С. Рогальський, В. М. Непийвода, П. В. Сосенко, С. І. Вознюк] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – № 3. – С. 62–70.

83. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. – К. : Наукова думка, 1992. – 216 с.

84. Холмский В. Г. Решение проектной задачи оптимального распределения реактивных мощностей методом потенциалов затрат / В. Г. Холмский, Ю. В. Щербина, С. В. Колесников // Электрические сети и системы. – Львов : Висшая школа. – 1968. – Вып. 4. – С. 6–9.

85. Зорин В. В. Моделирование и оптимизация режимов электрических сетей: автореф. дис. на здобуття наук. ступення докт. техн. наук: спец. 05.14.02 «Электрические станции, сети и системы» / В. В. Зорин. – М., 1983. – 34 с.

86. Рогальський Б. С. Методика расчета компенсации реактивной мощности в электрических сетях / Б. С. Рогальський // Энергетика и электрификация. – 1984. – № 2. – С. 36–39.

87. Рогальський Б. С. Компенсация реактивной мощности / Б. С. Рогальський // Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. – М. : Недра, 1985. – С. 84–110.

88. Рогальський Б. С. Компенсация реактивной мощности. Методы расчета и средства управления : учеб. пособ. / Б. С. Рогальський. – К. : УМК ВО, 1990. – 60 с.

89. Рогальський Б. С. Проблеми енергозбереження. Зниження втрат електроенергії в електричних мережах : навч. посіб. / Б. С. Рогальський. – Вінниця. : ВДТУ, 1996. – 112 с.

90. Временные указания по расчету уровней напряжения в электрических сетях промышленных предприятий / Тяжпромэлектропроект. – 1974. – 63 с.

91. Щодо відгуку на статтю «Використання синхронних двигунів для забезпечення технічних значень вхідних реактивних потужностей, заданих енергопостачальною компанією» / [Б. С. Рогальський, Ю. В. Грицюк, О. М. Нанака, І. П. Сосенко] // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2008. – № 1. – С. 47–51.

92. Справочник по проектированию электрических сетей / под. общей ред. С. С. Рокотяна, И. М. Шапиро. – М. : Энергия. – 1971. – 247 с.

93. Ще раз про визначення економічно доцільних обсягів споживання реактивної енергії / [Б. С. Рогальський., С. О. Кузмінська, А. В. Праховник і ін.] // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2005. – № 3. – С. 6–12.

94. Кудрин Б. И. История компенсации реактивной мощности: комментарий главного редактора / Б. И. Кудрин // Электрика. – Москва. – 2001. – № 6. – С. 26–29.

95. Кузнецов А. В. Новая методика расчета скидок и надбавок к тарифам на электроэнергию за потребление и генерацию реактивной мощности на потребительском рынке / А. В. Кузнецов // Материалы Четвертой российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 24–25 апреля 2003 г.

96. Владимиров Ю. В. К вопросу о целесообразности компенсации реактивной мощности в электрических сетях потребителей в свете действующей методики об оплате за перетоки реактивной электроэнергии / Ю. В. Владимиров, Т. А. Крамская, И. И. Смилянский // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Вип. 19, Т. II. – Харків : ХДТУСГ, 2003. – С. 169–174.

97. Владимиров Ю. В. Возможные рекомендации по выбору мощности компенсирующих устройств на промышленных предприятиях / Ю. В. Владимиров, Т. А. Крамская // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Електроенергетика і перетворююча техніка. – 2003. – № 9. – С. 9–12.

98. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво [Електронний ресурс]. – Наказ Міністерства економіки та з питань європейської інтеграції та Міністерства фінансів України від 26.09.01 №218/446. – Режим доступу : <http://zakon.nau.ua/doc/?uid=1022.307.0>

99. ГКД 340.000.002 – 97. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі.

100. ГКД 340.000.001 – 95. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Загальні методичні положення.

101. Рогальський Б. С. Методи поетапного розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем і спожив-

вачів / Б. С. Рогальський // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2001. – Вип. 1. – С. 22–39.

102. Рогальський Б. С. Удосконалення методу розрахунку компенсації реактивної потужності [Електронний ресурс] / Б. С. Рогальський, Ю. В. Грицюк, І. П. Сосенко // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2009. – № 1. – Режим доступу до журн. : <http://nbuv.gov.ua/e-journals/vntu/2009-1/2009-1.htm>

103. Чайка І. П. Моделювання впливу різних факторів на енергоефективність компенсації реактивних навантажень / І. П. Чайка // Вісник національного університету «Львівська політехніка» Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2009. – № 637. – С. 100–103.

104. Глушков В. М. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий / В. М. Глушков, В. П. Грибин. – М. : Энергия, 1975. – 104 с.

105. Омельчук А. О. Компенсація реактивної потужності як загальносистемна проблема / А. О. Омельчук, В. В. Козирський // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 4. – С. 31–39.

106. Рогальський Б. С. Алгоритм розрахунку вхідної реактивної потужності у вузлах енергосистем і споживачів електроенергії / Б. С. Рогальський, Хаддад Басам Туркі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1996. – № 1, 2. – С. 61–65.

107. Владимиров Ю. В. О методике расчетов оплаты за перетоки реактивной электроэнергии между энергоснабжающей организацией и ее потребителями / Ю. В. Владимиров // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сборник научных трудов. Выпуск 127. – Харьков : ХДПУ, 2000 г. – С. 105–109.

108. Приклади розрахунку плати за реактивну електроенергію / [Б. С. Рогальський, О. М. Нанака, А. В. Праховник і ін.] // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2009. – № 6. – С. 8–14.

Навчальне видання

**Лежнюк Петро Дем'янович
Нанака Олена Миколаївна**

**ФОРМУВАННЯ УМОВ ОПТИМАЛЬНОСТІ
КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ
І ЕНЕРГОПОСТАЧАЛЬНИХ КОМПАНІЙ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет – О. Нанака

Підписано до друку 12.11.2015 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,55.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2015-35

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.