

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк**

**ОПТИМІЗАЦІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ  
ТА ВИКОРИСТАННЯ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ  
УСТАНОВОК У РОЗПОДІЛЬНИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2018

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/411>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621:311

ДЗ1

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 26.10.2017 р.)

Рецензенти:

**Ю. І. Тугай**, доктор технічних наук

**П. Д. Лежнюк**, доктор технічних наук, професор

**Демов, О. Д.**

ДЗ1 Оптимізація впровадження та використання компенсувальних установок у розподільних електричних мережах споживачів : монографія / О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 80 с.  
ISBN 978-966-641-730-8

У роботі розглядається підвищення ефективності компенсації реактивної потужності шляхом розробки та реалізації нових методів розрахунку впровадження установок компенсації реактивної потужності та моделей управління ними у розподільних електричних мережах споживачів. Монографія може бути рекомендована інженерно-технічному персоналу енергетичних підприємств та проектних організацій для більш успішного проведення заходів зі зниження втрат електроенергії у розподільних електричних мережах. Книга може бути також використана студентами електротехнічних спеціальностей при вивченні курсів «Електропостачання», «Енергозбереження в системах електропостачання» і «Електричні системи та мережі».

УДК 621:311

ISBN 978-966-641-730-8

© О. Демов, Ю. Півнюк, 2018

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/411>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень.....	4
Вступ .....	5
1 Проблеми компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мережах споживачів.....	6
1.1 Аналіз існуючих методів розрахунку компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мережах.....	6
1.2 Аналіз використання існуючих компенсувальних установок.....	10
1.3 Проблеми розрахунку компенсації реактивної потужності та використання існуючих компенсувальних установок .....	12
2 Впровадження компенсувальних установок у розподільні електричні мережі споживачів .....	15
2.1 Еквівалентування живильних електричних мереж при розв'язанні задачі компенсації реактивної потужності в ринкових умовах.....	15
2.1.1 Еквівалентування живильних електричних мереж в умовах оптового ринку електроенергії .....	15
2.1.2 Еквівалентування живильних електричних мереж в умовах балансуєчого ринку електроенергії .....	28
2.2. Поетапний розрахунок компенсації реактивної потужності.....	29
2.2.1 Розв'язання задачі за економічною ефективністю.....	29
2.2.2 Розв'язання задачі за відносними спадами напруг.....	35
Висновки до розділу 2 .....	40
3 Підвищення ефективності існуючих компенсувальних установок у розподільних електричних мережах споживачів.....	41
3.1 Використання оперативних надлишків потужностей існуючих конденсаторних установок .....	41
3.2 Підвищення ефективності використання компенсувальних установок при забезпеченні заданої вхідної реактивної потужності.....	51
3.3 Підвищення ефективності використання синхронних машин для компенсації реактивної потужності .....	62
3.3.1 Підвищення ефективності використання синхронних двигунів.....	62
3.3.2 Підвищення ефективності використання синхронних генераторів місцевих електростанцій .....	67
Висновки до розділу 3.....	69
Висновки.....	70
Список використаних джерел.....	71

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВКУ – високовольтні конденсаторні установки  
ВРП – вхідна реактивна потужність  
ЕЕРП – економічний еквівалент реактивної потужності  
ЕК – енергопостачальна компанія  
ЕМ – електрична мережа  
ЖЕМ – живильні електричні мережі  
КРП – компенсація реактивної потужності  
КУ – компенсувальна установка  
МЕ – місцева електростанція  
НКУ – низьковольтні конденсаторні установки  
РЕМ – розподільна електрична мережа  
ТП – трансформаторна підстанція  
СГ – синхронний генератор  
СД – синхронний двигун  
СМ – синхронна машина

## ВСТУП

Впровадження компенсувальних установок у розподільні електричні мережі споживачів дозволяє значно зменшити втрати активної потужності і знизити плату за реактивну електроенергію. Щоб цього досягнути потрібне визначення доцільних значень потужностей КУ і місць їх встановлення [1]. В існуючих методах розв'язання цієї задачі [2–7] вважається, що споживачі, на балансі яких знаходяться розподільні електричні мережі, мають можливість установити всі КУ одночасно, а проміжні кроки з впровадження результатів при цьому не розглядаються. Фінансові можливості споживачів, як правило, обмежені і це унеможливує процес встановлення КУ в усіх вузлах РЕМ одночасно, що в свою чергу потребує розподілення їх впровадження в часі.

Додаткового зменшення втрат електричної енергії можна досягнути не лише шляхом встановлення нових КУ, а також більш ефективним використанням існуючих. Це, в свою чергу, вимагає відповідного вдосконалення режиму їх роботи. Зокрема, в існуючих способах керування потужностями КУ не у повній мірі враховується взаємний вплив КУ встановлених у різних вузлах електричної мережі, що знижує їх ефективність роботи.

Таким чином, виникає задача підвищення ефективності роботи компенсувальних установок шляхом розробки та реалізації методів їх раціонального впровадження та використання у розподільних електричних мережах споживачів.

Для досягнення цієї мети у монографії розроблено методи, які дозволять проводити розрахунок поетапної компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мережах споживачів з врахуванням впливу електричних мереж енергопостачальних компаній. Також розроблені нові моделі та пристрої автоматичного керування потужностями КУ, що дозволяє підвищити ефективність їх використання.

Монографія може бути рекомендована інженерно-технічному персоналу промислових енергетичних підприємств та проектних організацій для проведення заходів зі зменшення втрат електроенергії у розподільних електричних мережах. Книга може бути також використана студентами електротехнічних спеціальностей при вивченні курсів «Електропостачання», «Енергозбереження в системах електропостачання» і «Електричні системи і мережі».

# **1 ПРОБЛЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ**

Розрахунок компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мережах споживачів потребує розробки систем, що будуть стимулювати до раціонального споживання реактивної потужності і відображати реальні затрати на її виробництво та передачу; підвищувати ефективність функціонування всього комплексу пристроїв КРП в електричних мережах як споживачів, так і енергопостачальних компаній. Існуючі методи планування впровадження КУ у розподільні електричні мережі споживачів не в повній мірі враховують техніко-економічні умови генерації, транспортування та споживання реактивної потужності в умовах балансуючого ринку електроенергії і, відповідно, потребують аналізу та визначення напрямків їх вдосконалення, що і є предметом досліджень у цьому розділі. Такий підхід потребує аналізу основних положень розрахунку КРП у розподільних електричних мережах; впливу живильних електричних мереж на компенсацію реактивної потужності у розподільних електричних мережах споживачів; використання існуючих компенсувальних установок в умовах ринку електроенергії. Схему такого аналізу представлено на рис. 1.1.

## **1.1 Аналіз існуючих методів розрахунку компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мережах**

Питання зменшення втрат електроенергії в електричних мережах є однією з основних задач енергетичної галузі України. Втрати електроенергії перевищують аналогічні показники західних країн [8]. Технологічні втрати активної електроенергії разом з так званими «комерційними втратами» станом на 2016 рік склали 11,7 % [9].

Значного зменшення зазначених втрат можна досягти за рахунок компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мережах. Відомо, що близько 80 % ефекту від заходів зі зменшення технологічних втрат у відповідних мережах припадає на КРП [1].

Проведення цих заходів забезпечується існуючими методами розрахунку КРП, які розглянуті в роботах [10–28] таких вчених, як О. О. Глазунов, В. А. Веніков, Г. Е. Поспелов, В. Г. Холмский, Н. А. Мельніков, Ю. В. Щербина, В. В. Зорін, Г. М. Каялов, Л. А. Солдаткіна, І. М. Маркович, В. Г. Кузнецов, Б. С. Рогальський, П. Д. Лежнюк, Ю. І. Тугай, Ю. Є. Варецький, М. С. Сегеда, О. С. Яндудльський, Д. Б. Банін.

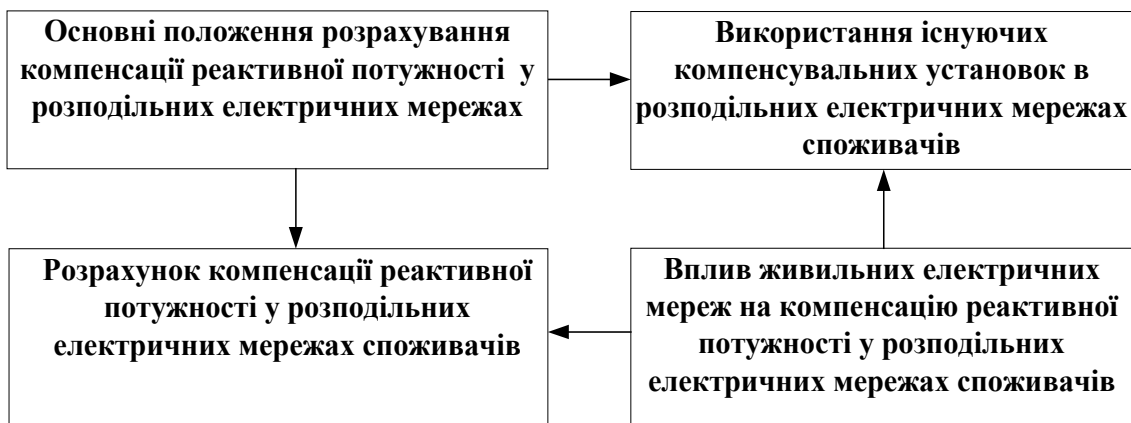


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема аналізу існуючих методів КРП у розподільних електричних мережах споживачів

Зупинимось на основних критеріях оптимізації КРП:

- економічні: максимальне зменшення втрат електроенергії, мінімальний термін окупності капіталовкладень у КУ, мінімум приведених затрат на передачу та генерацію реактивної потужності [1, 2, 5, 6, 17];

- технічні: забезпечення балансу реактивної потужності [12, 24], покращення рівнів напруги [12, 15], збільшення пропускної спроможності електричних мереж [2].

Розв’язання задачі КРП полягає у визначенні таких потужностей і місць установлення КУ, які забезпечують виконання заданого критерію.

Інвестування у КУ може визначатися, виходячи з інтересів держави. В такому випадку найкращий варіант впровадження КУ визначається за мінімумом приведених затрат на передачу та генерацію реактивної потужності як по електричних мережах ЕК, так і споживачів. Такий підхід доцільно також застосовувати, коли електричні мережі споживачів і ЕК знаходяться на балансі однієї організації і задано нормативну величину економічної ефективності [2, 5, 6]. Але в сьогоденних ринкових умовах розрахунок КРП у розподільних електричних мережах споживачів доцільно проводити у відповідності до показників, які визначають загальний економічний стан підприємства (економічна ефективність використання капітальних вкладень, прибуток, рентабельність) [29–32].

Таким чином, критерії впровадження КУ можуть бути різними в залежності від економічних умов, в яких знаходяться споживачі.

Компенсація реактивної потужності у розподільних електричних мережах споживачів зумовлює зменшення втрат електроенергії не тільки у них, а й у живильних електричних мережах ЕК [10]. Відповідно КРП у перших електричних мережах необхідно проводити із врахуванням впливу інших.

Ознаки впливу живильних електричних мереж на компенсацію реактивної потужності у розподільних електричних мережах споживачів відображено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вплив живильних електричних мереж при розрахунку КРП у розподільних електричних мережах споживачів

№ з. п.	Ознака впливу	Сутність впливу
1	Задана вхідна реактивна потужність для розподільної електричної мережі споживача	Вхідна реактивна потужність визначається за мінімумом затрат на передачу і генерацію реактивної потужності по живильних і розподільних електричних мережах споживачів [2, 6, 10]
2	Заданий коефіцієнт потужності для розподільної електричної мережі	Коефіцієнт потужності визначається техніко-економічним станом живильних мереж [7]
3	Задані рівні напруги на вході в розподільну електричну мережу споживача	Рівні напруги визначаються нормальною роботою споживачів [15]
4	Врахування зменшення втрат активної потужності у живильних електричних мережах при КРП у розподільних електричних мережах споживачів	Зменшення втрат визначається через еквівалентні економічні характеристики живильних електричних мереж [2, 10]

Розглянемо детальніше впливи, описані в табл. 1.1.

Якщо розрахунок КРП проводиться за мінімумом приведених затрат на передачу та генерацію реактивної потужності, то вплив живильних електричних мереж відображається вхідними реактивними потужностями, які доцільно передавати від живильних електричних мереж в розподільні електричні мережі споживачів [2, 6].

В ринкових умовах розподільні і живильні електричні мережі можуть знаходитися на балансі різних юридичних суб'єктів, які мають різні економічні інтереси і їх потрібно враховувати. Це потребує вдосконалення існуючих методів розрахунку ВРП.

В [7] вплив живильних електричних мереж на розподільні задається нормованим коефіцієнт потужності, що науково необґрунтовано.



В [15] напруга у вузлах живильних електричних мереж визначається режимом роботи електричної мережі по реактивній потужності. Відповідно ВРП для споживача необхідно визначати з врахуванням необхідного рівня напруги у його розподільній електричній мережі.

В умовах оптового ринку електроенергії споживачі купують реактивну електроенергію в ЕК. Економічно ця плата зумовлена додатковими втратами в мережах ЕК від перетоків реактивної потужності. В цьому випадку мережі ЕК доцільно замінити еквівалентним джерелом реактивної потужності з характеристиками  $\sigma$ ,  $\delta$ , які дозволяють знайти зниження втрат  $\delta P_i$  у вказаних мережах при встановленні в мережах  $i$ -го споживача КУ потужністю  $Q_{ki}$

$$\delta P_i = \sigma_i Q_{ki} + \frac{\delta_i}{2} Q_{ki}^2, \quad (1.1)$$

де  $\sigma_i$  та  $\delta_i$  – перша та друга похідні від функції сумарних втрат активної потужності в електричних мережах ЕК  $\Delta P_i(Q)$  по реактивному навантаженню  $Q_i$   $i$ -го споживача [10, 27].

Економічні характеристики еквівалентного джерела реактивної потужності залежать не тільки від реактивного навантаження  $i$ -го вузла, а і від реактивних навантажень інших вузлів енергосистеми.

Вплив живильних електричних мереж визначається також за допомогою економічних еквівалентів реактивної потужності. Існує низка методів із визначення ЕЕРП. В [27] показано, що величину ЕЕРП можна визначити як

$$D_i = \frac{d[\Delta P_i(Q)]}{dQ_i}. \quad (1.2)$$

Якщо  $\Delta Q_i \ll Q_{pi}$ , то величину приросту функції  $\Delta P_i(Q_i)$  при зміні  $Q_i$  на величину  $\Delta Q_i$  можна визначати як

$$\delta P_i = D_i \Delta Q_i, \quad (1.3)$$

де  $Q_{pi}$  – розрахункове реактивне навантаження  $i$ -го вузла.

Розрахунки величини  $\delta P_i$ , зумовленої реактивним навантаженням  $Q_{pi}$ , за формулою (1.3) мають велику похибку. Крім того в цьому випадку величина  $D_i$  залежить від реактивних навантажень всіх вузлів мережі, що ускладнює розрахунок.

В [33, 34] рекомендується розраховувати середнє значення ЕЕРП:

$$D_{ic} = \frac{\Delta P_{pi}}{Q_{pi}}, \quad (1.4)$$

де  $\Delta P_{pi}$  – втрати активної потужності, створені навантаженням  $Q_{pi}$ , у мережі, яка живить  $i$ -й вузол.

У формулі (1.4) показано, що величина  $D_{ic}$  залежить від величини  $Q_{pi}$ . Тобто при різних значеннях  $Q_{pi}$  для одного і того ж вузла будемо мати різні величини  $D_{ic}$ . Це є недоліком цього підходу, оскільки ЕЕРП характеризує умови передачі потужності  $Q_i$  і не має залежати від величини цієї потужності.

Таким чином, виникає задача вдосконалення методів еквівалентування живильних електричних мереж при розрахунку КРП у розподільних мережах споживачів [35, 36].

В умовах балансуючого ринку електроенергії споживач повинен бути забезпечений реактивною потужністю протягом доби з найменшими затратами на її виробництво та передачу [37]. Ці затрати зумовлені втратами активної потужності від реактивних навантажень споживачів в ЖЕМ. Тобто в умовах балансуючого ринку необхідно враховувати зміну зменшення втрат у живильних електричних мережах протягом доби.

## 1.2 Аналіз використання існуючих компенсувальних установок

Підвищення ефективності роботи існуючих компенсувальних установок є важливим заходом зі зменшення втрат в електричних мережах. В основному цього можна досягнути шляхом вдосконалення автоматичного керування потужністю КУ. Існуючі моделі керування КУ базуються на інформації про втрати, зумовлені реактивними навантаженнями вузлів, де встановлені КУ [38, 39]. При цьому не враховуються впливи реактивних навантажень інших вузлів та живильної електричної мережі, що приводить до зниження ефективності використання КУ. Так, змінюючи ступінь КРП в електричних мережах одного споживача, можна змінити втрати активної потужності, що створюються реактивним навантаженням іншого споживача [36]. Проведемо аналіз цього впливу.

Реактивні навантаження розподільних електричних мереж зумовлені споживанням реактивної потужності промисловими (або до них прирівняними) та комунально-побутовими споживачами. Перші від-

повідно до своїх економічних інтересів проводять КРП своїх реактивних навантажень, а компенсацію реактивних навантажень комунально-побутових навантажень здійснює в основному ЕК. При цьому не враховується те, що КУ промислових підприємств доцільно використати не тільки для зменшення втрат, зумовлених реактивними навантаженнями цих підприємств, а і комунально-побутових споживачів, в яких відсутні КУ [35, 40].

Нехай сумарна потужність КУ, установлених в електричних мережах споживачів ЕК –  $Q_{KY}$ . Якщо вважати, що функція потужності КУ від часу  $t$  –  $Q_{KY}(t)$ , то енергія, що може генеруватися цими КУ протягом періоду  $T$  визначається як

$$W_Q = \int_0^T Q_{KY}(t) dt, \quad (1.5)$$

де  $T$  – період зміни потужності КУ.

При використанні КУ на повну потужність протягом часу  $T$  максимальна реактивна енергія, що може генеруватися КУ,

$$W_{Qmax} = Q_{KY}T. \quad (1.6)$$

Коефіцієнт використання КУ, установлених в електричних мережах споживачів,

$$k_g = \frac{W_Q}{W_{Qmax}} = \frac{\int_0^T Q_{KY}(t) dt}{Q_{KY}T}. \quad (1.7)$$

Оскільки КУ використовуються тільки у певні проміжки доби, то коефіцієнт використання КУ є недостатнім. Для підвищення цього коефіцієнта доцільно КУ використовувати не тільки для компенсації реактивних навантажень вузлів, в яких вони встановлені, а й в інших, в яких відсутні КУ. Для цього можна використати частину потужностей КУ, які в певні періоди доби не ввімкнені (оперативні надлишки потужностей КУ). Наприклад, КУ промислових підприємств можна використовувати для КРП комунально-побутових споживачів [40].

Відповідно виникає необхідність розробки моделей і пристроїв, що використовують оперативні надлишки потужностей КУ промислових підприємств.

Однією із задач керування потужністю КУ є забезпечення заданої енергопостачальною компанією ВРП при мінімумі втрат активної потужності у розподільних мережах споживачів. В існуючих моделях управління потужностями КУ [19] не враховується різна конфігурація розподільних електричних мереж і взаємний вплив реактивних навантажень розподільної електричної мережі, що звужує область їх застосування і знижує ефективність.

Для компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мережах споживачів використовуються синхронні машини (двигуни, генератори). Управління потужностями синхронних двигунів розглянуте у роботах [41, 42]. Це управління забезпечує задану ВРП та мінімум втрат активної потужності в електричних мережах споживача. Проте, в цих роботах не враховується зміна втрат в електричних мережах ЕК у залежності від реактивного навантаження споживачів, що знижує ефективність керування. Також не враховується зміна цих втрат при використанні генераторів МЕ, що не дозволяє знизити плату споживачам за використану реактивну електроенергію.

### **1.3 Проблеми розрахунку компенсації реактивної потужності та використання існуючих компенсаційних установок**

Проведений аналіз в п.1.1 і п.1.2 дозволяє сформулювати проблеми, які виникають при компенсації реактивної потужності у розподільних електричних мережах споживачів. Ці проблеми доцільно розділити на: технічні та економічні.

*Технічні проблеми:*

1. Фізично будь-яке рішення щодо КРП у розподільних електричних мережах споживачів впливає на розв'язання задачі в інших частинах електричних мереж. Відповідно необхідно:

– врахувати вплив живильних електричних мереж ЕК при розрахунку КРП у розподільних електричних мережах споживачів [10, 11, 35].

– КРП потрібно проводити одночасно як для розподільних електричних мереж енергосистеми, так і споживачів [35].

В [6] розроблені основні теоретичні положення розрахунку КРП для розподільних електричних мереж споживачів з врахуванням впливу живильних електричних мереж. В цьому випадку задача розв'язується за мінімумом приведених витрат на передачу і генера-

цію реактивної потужності при дотриманні технічних обмежень. Недоліком є те, що живильні електричні мережі враховуються в повному об'ємі, що ускладнює задачу.

В [35] показано, що величина зменшення втрат в електричних мережах ЕК від установа КУ в електричних мережах промислових споживачів залежить не тільки від реактивних навантажень промислових споживачів, а і від реактивних навантажень комунально-побутових споживачів. Це дає можливість підвищити ефективність роботи КУ і потребує розробки моделей та приладів з використання потужності КУ.

Підвищення ефективності існуючих КУ можна досягнути таким чином:

- використовувати оперативні надлишки потужності існуючих КУ одних вузлів для компенсації реактивних навантажень інших вузлів;
- при забезпеченні заданої ВРП враховувати: різну конфігурацію розподільних електричних мереж і взаємний вплив реактивних навантажень цих мереж; зміну втрат у живильних електричних мережах енергопостачальних компаній в залежності від реактивного навантаження синхронних машин.

2. При проведенні практичних розрахунків за існуючою методикою («Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами») [27], виникають такі труднощі:

- практично складно врахувати техніко-економічні особливості генерації, передачі та споживання реактивної потужності в електричних мережах ЕК та споживачів, що знижує об'єктивність результатів розрахунку;
- розрахунок проводиться централізовано за спеціально розробленими програмами, що потребує значних затрат та ускладнює перевірку його результатів споживачами.

Таким чином, виникає необхідність у розробці спрощеного методу розрахунку плати за реактивну електроенергію, який би враховував концепцію системного підходу [22] і давав можливість споживачам прогнозувати результати впровадження КУ.

3. Відповідно до існуючих методів [1–7] розв'язання задачі КРП проводиться за двома критеріями: максимальним зниженням втрат і забезпеченням допустимих рівнів напруги у навантажувальних вузлах

електричної мережі. Розв'язання задачі в такій постановці потребує складних математичних методів, зокрема методів нелінійного програмування [12]. Результати розрахунків, одержані вказаними методами, практично складно перевірити на відповідність обом критеріям, оскільки вони характеризують різні технічні параметри. З іншої сторони у [12] показано, що ці критерії мають спільну фізичну природу, що дає можливість формувати інтегральні показники, які одночасно оцінюють втрати активної потужності і спади напруги.

*Економічні проблеми:*

1. Споживачі є незалежними економічними суб'єктами, які самостійно вирішують доцільність інвестування у різні напрямки своєї діяльності, у тому числі і придбання КУ. Економічну ефективність відповідного інвестування доцільно визначати за абсолютною економічною ефективністю капітальних вкладень або очікуваним прибутком генерації реактивної потужності [23, 31]. Такий підхід дозволяє керівникові підприємства порівнювати інвестування у КУ з інвестуванням інших виробничих і комерційних проектів.

При цьому в умовах оптового ринку між ЕК і споживачем встановлені відносини виробника і споживача такого «специфічного товару», як реактивна електроенергія. Яку кількість цього «товару» споживати (купувати) вирішує підприємство, а енергопостачальна компанія вирішує, на яких умовах продавати цю електроенергію. Ці умови формують плату за реактивну електроенергію [27].

2. В ринкових умовах споживачі впроваджують КУ, як правило, в умовах дефіциту коштів. Відповідно споживачі не можуть установити КУ в усіх вузлах одночасно [35]. Тобто установлення КУ є процесом (послідовністю заходів, направлених на установлення КУ) і виникає питання: як його реалізувати?

## **2 ВПРОВАДЖЕННЯ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК У РОЗПОДІЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ СПОЖИВАЧІВ**

Оптимізація процесів впровадження КУ в електричні мережі споживачів і енергопостачальних компаній базується на однакових фізичних принципах і є єдиним цілим. Але з іншої сторони споживачі є незалежними економічними суб'єктами і їхні мережі мають техніко-економічні особливості з передачі, генерування та споживання реактивної енергії, що впливає на КРП.

Оскільки ЕК однозначно не вимагає встановлення КУ, то доцільність встановлення КУ в електричних мережах споживачів визначається шляхом співставлення економічної ефективності інвестування в КУ з інвестуванням в інші виробничі та комерційні проекти. Такий підхід потребує забезпечення заданої економічної ефективності КУ, що досягається в основному за рахунок зниження плати за реактивну електроенергію. Ця плата формується втратами активної потужності від передачі реактивної в електричних мережах ЕК (живильних мережах), що потребує їх еквівалентування [27]. Оскільки плата за реактивну електроенергію проводиться в ринкових умовах, то розглянемо еквівалентування живильних електричних мереж для умов оптового та балансуєчого ринків електроенергії.

### **2.1 Еквівалентування живильних електричних мереж при розв'язанні задачі компенсації реактивної потужності в ринкових умовах**

#### **2.1.1 Еквівалентування живильних електричних мереж в умовах оптового ринку електроенергії**

В п. 1.1 показано, що найбільш доцільним в умовах оптового ринку є еквівалентування ЖЕМ за втратами потужності. Проведемо аналіз трьох методів такого еквівалентування за:

- коефіцієнтом розподілу втрат;
- коефіцієнтом потужності;
- відносними спадам напруги.

Розглянемо можливість еквівалентування живильних електричних мереж за допомогою коефіцієнтів розподілу втрат для елементарної схеми, заступну схему якої зображено на рис. 2.1.

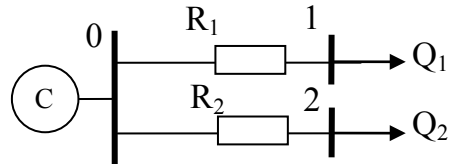


Рисунок 2.1 – Заступна схема розрахункової мережі: С – енергосистема;  
 $R_1, R_2$  – активні опори відповідно ділянок 01 і 02

Знайдемо втрати, які створюють відповідно реактивні навантаження  $Q_1$  і  $Q_2$ :

$$\Delta P_1 = \Delta U_1 \cdot \frac{Q_1}{U_1}, \quad \Delta P_2 = \Delta U_2 \cdot \frac{Q_2}{U_1}, \quad (2.1)$$

де  $\Delta U_1, \Delta U_2$  – спади напруги на ділянці 01 відповідно від протікання реактивних навантажень  $Q_1$  і  $Q_2$ ;  $U_1, U_2$  – напруги відповідно у вузлах 1 і 2.

Якщо врахувати, що  $\Delta U_{1*} = \frac{\Delta U_1}{U_1}$  і  $\Delta U_{2*} = \frac{\Delta U_2}{U_2}$  – відносні спади напруги, то (2.1) переписеться:

$$\Delta P_1 = \Delta U_{1*} \cdot Q_1, \quad \Delta P_2 = \Delta U_{2*} \cdot Q_2. \quad (2.2)$$

Останні вирази перепишемо з врахуванням коефіцієнтів розподілу сумарного навантаження  $Q = Q_1 + Q_2$ :

$$\Delta P_1 = \Delta U_{1*} \cdot c_1 \cdot Q; \quad \Delta P_2 = \Delta U_{2*} \cdot c_2 \cdot Q, \quad (2.3)$$

де  $c_1 = \frac{Q_1}{Q}$  і  $c_2 = \frac{Q_2}{Q}$ .

В загальному вигляді втрати потужності в  $s$ -й вітці від реактивної потужності  $i$ -го вузла можуть бути визначені:

$$\Delta P_{is} = \Delta U_{i*} \cdot c_{is} \cdot Q_i. \quad (2.4)$$

Оскільки величина  $\Delta U_{i*} \cdot c_{is}$  визначається аналогічно коефіцієнту розподілу втрат  $t_{is}$ , то для розрахунку ЕЕРП можливо і доцільно використовувати метод розрахунку коефіцієнтів розподілу втрат [43]. В цьому випадку втрати, які створює навантаження  $Q_i$  в  $s$ -й вітці електричної мережі можна представити таким чином:

$$\Delta P_{is} = t_{is} Q_i, \quad (2.5)$$

де  $t_{is}$  –  $is$ -й елемент матриці коефіцієнтів розподілу втрат  $T$ .



У формулі (2.5) показано, що коефіцієнт  $t_{is}$  показує частку втрат активної потужності в  $s$ -й вітці від реактивного навантаження  $i$ -го вузла  $Q_i$ . Відповідно частка втрат в електричній мережі, яка зумовлена реактивним навантаженням  $Q_i$ , визначиться як

$$\Delta P_i = Q_i \sum_{s=1}^b t_{is} \text{ або } \Delta P_i = T_i Q_i, \quad (2.6)$$

де  $T_i = \sum_{s=1}^b t_{is}$  – сума елементів  $s$ -го стовпця матриці  $T$  коефіцієнтів розподілу втрат потужності в мережі;  $s = 1 \dots b$ ;  $b$  – кількість віток в електричній мережі.

Тобто  $T_i = D_i$ .

Розглянемо детальніше зв'язок матриці коефіцієнтів розподілу втрат з ЕЕРП. Матриця коефіцієнтів розподілу втрат для довільної електричної схеми має такий вигляд [44]:

$$T = U_y^T \cdot M_E \cdot C \cdot U_d^{-1}, \quad (2.7)$$

де  $U_y^T$  – транспонована матриця вузлових напруг мережі;  $M_E$  – перша матриця з'єднань мережі;  $C$  – матриця коефіцієнтів струморозподілу;  $U_d^{-1}$  – обернена діагональна матриця вузлових напруг.

Матриця коефіцієнтів струморозподілу для схеми з активними опорами визначається як [44]

$$C = R_v^{-1} \cdot M^T \cdot (M \cdot R_v^{-1} \cdot M^T)^{-1}, \quad (2.8)$$

де  $R_v^{-1}$  – обернена діагональна матриця активних опорів віток мережі;  $M^T$  – транспонована матриця з'єднань мережі.

Підставимо (2.8) в (2.7) і одержимо матрицю ЕЕРП:

$$D = T = U_y^T \cdot M_E \cdot R_v^{-1} \cdot M^T (M \cdot R_v^{-1} \cdot M^T)^{-1} \cdot U_d^{-1} \quad (2.9)$$

У формулі (2.9) показано, що на відміну від існуючих методів [19–27], величини ЕЕРП не залежать від реактивних навантажень інших вузлів.

### Приклад.

Для ЕМ, заступна схема і параметри якої зображені на рис. 2.2, знайти сумарні втрати активної потужності і втрати, які створюються реактивними навантаженнями кожного вузла. При цьому використати ЕЕРП, знайдені на основі коефіцієнтів розподілу втрат потужності.

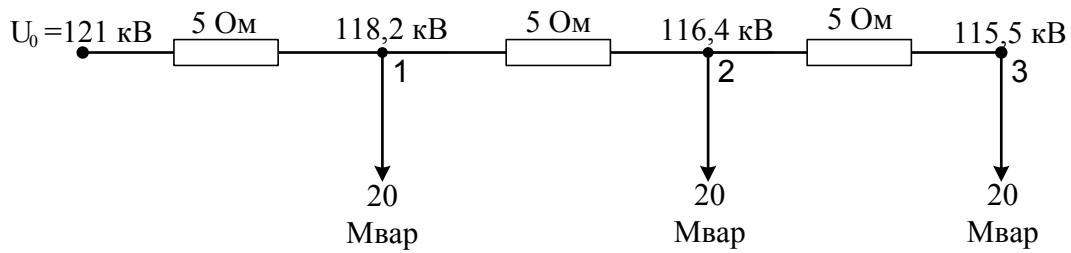


Рисунок 2.2 – Заступна схема розрахункової ЕМ

Розв'язання.

Відповідно [44] знайдемо матриці  $M_E$ ,  $M$ ,  $Q$ ,  $U_y$ ,  $U_d$ ,  $R_v$ :

$$M_E = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} -20 \\ -20 \\ -20 \end{bmatrix}, \text{Мвар};$$

$$U_y = \begin{bmatrix} 118,2 \\ 116,4 \\ 115,5 \\ 121 \end{bmatrix}, \text{кВ}; U_d = \begin{bmatrix} 118,2 & 0 & 0 \\ 0 & 116,4 & 0 \\ 0 & 0 & 115,5 \end{bmatrix}, \text{кВ}; R_v = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}, \text{Ом}.$$

Відповідно (2.9) знайдемо матрицю ЕЕРП:

$$D = \begin{bmatrix} 118,2 \\ 116,4 \\ 115,5 \\ 121 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T \times$$

$$\times \left( \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T \right) \times \begin{bmatrix} 118,2 & 0 & 0 \\ 0 & 116,4 & 0 \\ 0 & 0 & 115,5 \end{bmatrix}^{-1} =$$

$$= \begin{bmatrix} -0,023 & -0,039 & -0,047 \end{bmatrix}, \frac{\text{кВт}}{\text{квар}}$$

Знайдемо втрати, створені відповідно реактивними навантаженнями першого, другого та третього вузлів, а також сумарні втрати:

$$\Delta P_1 = D_1 \cdot Q_1 = 0,023 \cdot 20 = 0,46 \text{ (МВт)},$$

$$\Delta P_2 = D_2 \cdot Q_2 = 0,039 \cdot 20 = 0,78 \text{ (МВт)},$$

$$\Delta P_3 = D_3 \cdot Q_3 = 0,047 \cdot 20 = 0,94 \text{ (МВт)},$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 0,46 + 0,78 + 0,94 = 2,18 \text{ (MBm)}.$$

Знайдемо сумарні втрати в ЕМ, класичним методом:

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{I}{U_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n Q_s^2 \cdot R_s = \frac{(60)^2}{115^2} \cdot 5 + \frac{(40)^2}{115^2} \cdot 5 + \frac{(20)^2}{115^2} \cdot 5 = 2,1 \text{ (MBm)},$$

де  $Q_s, R_s$  – відповідно реактивний потік в  $s$ -й вітці ЕМ і активний опір цієї вітки.

Оскільки величини втрат, знайдених обома методами, практично збігаються, то ЕЕРП можна знаходити з допомогою коефіцієнтів розподілу втрат.

Запропонований метод розрахунку ЕЕРП базується на даних про схему ЕМ ЕК та її параметри, відповідає фізичним умовам формування втрат активної потужності від перетоків реактивної і дозволяє прогнозувати величину плати за реактивну електроенергію [45–47]. Крім того коефіцієнти розподілу втрат є величинами, які використовуються при розрахунку втрат; їх розподілі між суб'єктами оптового ринку електроенергії і, відповідно, їх значення є в базі даних підприємств електричних мереж. В цьому випадку спеціальні програми [48] для розрахунку ЕЕРП можна не використовувати.

*Еквівалентування живильних електричних мереж за коефіцієнтом потужності.* Розглянемо спрощений метод еквівалентування ЖЕМ, який давав би споживачам можливість прогнозувати результати впровадження КУ в залежності від своїх фінансових можливостей, а ЕК координувати процес впровадження, виходячи як зі своїх, так і з загальнодержавних інтересів. Для цього мережі ЕК по відношенню до споживача замінимо еквівалентним активним опором  $R_e$  і величину втрат активної енергії в цих ЕМ від передачі реактивного навантаження споживача відповідно до і після встановлення КУ представимо як:

$$\Delta W_{до} = \frac{P^2}{\cos^2 \varphi_{до} \cdot U_m^2} \cdot R_e \cdot \tau; \quad \Delta W_{після} = \frac{P^2}{\cos^2 \varphi_{після} \cdot U_m^2} \cdot R_e \cdot \tau, \quad (2.10)$$

де  $P$  – активне навантаження споживача;  $\cos \varphi_{до}, \cos \varphi_{після}$  – коефіцієнт потужності споживача відповідно до та після встановлення КУ;  $U_m$  – напруга ЕМ енергосистеми;  $\tau$  – тривалість максимальних втрат мережі ЕК від реактивного навантаження споживача.

Відповідно відносне зниження втрат в ЕМ ЕК за рахунок встановлення КУ в ЕМ споживача

$$k = \frac{\Delta W_{\partial o}}{\Delta W_{\text{нісля}}} = \left( \frac{\cos \varphi_{\text{нісля}}}{\cos \varphi_{\partial o}} \right)^2. \quad (2.11)$$

Якщо вважати величину  $\cos \varphi_{\text{нісля}}$  нормованим коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_n$ , то величина  $k$  може використовуватися для розрахунку додаткових втрат від перетоку реактивної потужності споживача по ЕМ ЕК при відхиленні поточного коефіцієнта потужності від нормованого:

$$\Delta W_{\partial o} = (k - 1)\alpha W, \quad (2.12)$$

де  $\alpha$  – нормована частка технічних втрат в ЕМ ЕК;  $W$  – величина споживаної електроенергії користувачем.

Відповідно можна визначити плату за реактивну електроенергію як додаткову  $\Pi_Q$  до плати за споживану активну електроенергію  $\Pi$ :

$$\Pi_Q = (k - 1)\alpha \Pi. \quad (2.13)$$

Величину  $(k - 1)\alpha$  доцільно назвати надбавкою до плати за споживану електроенергію:

$$\delta = (k - 1)\alpha. \quad (2.14)$$

Як видно з формул, величина  $\delta$  залежить в основному від нормованого коефіцієнта потужності. Цей коефіцієнт повинен враховувати віддаленість споживачів від джерел реактивної потужності і може визначатися з врахуванням загальнодержавних інтересів [2, 7]. При значеннях  $\cos \varphi$  нижчих від нормованого значення  $\cos \varphi_n$  споживач платить надбавку до тарифу, при вищих – одержує скидку до тарифу.

Проведемо порівняльний аналіз запропонованого методу та існуючої методики розрахунку плати за реактивну електроенергію  $\Pi_Q$ . Вказана плата відповідно до існуючої методики визначається як

$$\Pi_Q = W_Q D T, \quad (2.15)$$

де  $W_Q$  – величина споживаної реактивної енергії;  $D$  – економічний еквівалент реактивної потужності;  $T$  – тариф за активну електроенергію.

З іншого боку за аналогією з (2.12) величину втрат  $\Delta P_Q$  можна представити як

$$\Delta P_Q = (k - 1)\alpha P, \quad (2.16)$$

а величину  $D$  відповідно:

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях [Утв. Госэнергонадзором СССР 30.08.73] – М. : Энергия, 1974. – 73 с.
3. Гительсон С. М. Экономические решения при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий. / С. М. Гительсон. – М. : Энергия, 1971. – 256 с.
4. Грейсух М. В. Расчеты по электроснабжению промышленных предприятий / М. В. Грейсух, С. С. Лазарев. – Энергоатомиздат, 1971. – 312 с.
5. Каялов Г. М. Основы построения промышленных сетей / Г. М. Каялов, Е. А. Каждан, И. Н. Ковалев, Э. Г. Куренный. – М. : Энергия, 1978. – 112 с.
6. Ковалев И. Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И. Н. Ковалев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.
7. Руководящие указания по повышению коэффициента мощности в установках потребителей электрической энергии. – М. : Госэнергоиздат, 1961. – 20 с.
8. Павловський В. В. Інженерний розрахунок втрат потужності та енергії в електричних мережах, оснований на моделюванні установившихся режимів. / В. В. Павловський, Г. Е. Куденко // Електричні мережі та системи. – 2004. – № 3. – С. 17–22.
9. Розвиток *Smart Grid* технологій в Україні дозволить значно зменшити втрати електроенергії в електромережах та підвищити надійність постачання електроенергії споживачам відповідної якості [Електронний ресурс] / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. – Режим доступу: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245218941&cat\\_id=244895180](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245218941&cat_id=244895180).
10. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Ф. Ф. Карпов. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.
11. Указания по проектированию компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий [Утв. Главэлектромонтажем Минмонтажспецстроя СССР приказом № 9 – 12–17 от 3.10.1984]. – М. : [б. в.], 1984.

12. Мельников Н. А. Электрические сети и системы / Н. А. Мельников. – М. : Энергия, 1969. – 456 с.
13. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях / Н. А. Мельников. – М. : Энергия, 1975. – 128 с.
14. 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. – 1968. – Львов : Высшая школа. – Вып. 4. – С. 69–72.
15. Мельников Н. А. Регулирование напряжения в электрических сетях / Н. А. Мельников, Л. А. Солдаткина. – М. : Энергия, 1968. – 124 с.
16. Варецкий Ю. О. Регулювання напруги в мережі за допомогою статичного компенсатора / Ю. О. Варецкий // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 5. – С. 69–73.
17. Железко Ю. С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко // Электричество. – 1992. – № 5. – С. 6–12.
18. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.
19. Рогальський Б. С. Методи розрахунку електроспоживання і компенсуючих установок та системи управління ними (на промислових підприємствах, включаючи нерудні кар'єри): дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 / Б. С. Рогальський. – Дніпропетровськ, 1999. – 301 с.
20. Зорин В. В. К вопросу об оплате за реактивную электрическую энергию / В. В. Зорин // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 1. – 68–72 с.
21. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. – К. : Наукова думка, 1992. – 216 с.
22. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
23. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача) [Затверджено наказом № 1 Міністерства палива та енергетики України від 05.01.2006 р.
24. Сиуда И. П. Алгоритм расчета мощности компенсирующих устройств в сетях электроэнергетических систем / И. П. Сиуда, В. И. Свешников // Известия академии наук СССР. – 1978. – № 2. – С. 148–152.

25. Глазунов А. А. Электрические сети и системы / А. А. Глазунов, А. А. Глазунов. – 4-е изд., переработаное и доп. – М. : Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.
26. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи : навч. посіб. / М. С. Сегеда. – Львів : Каменяр, 1999. – 296 с.
27. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами // Офіційний вісник України. – 2002. – № 6. – С. 25–31.
28. Идельчик В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
29. Гудко Є. І. Про доцільність установлення конденсаторних батарей у промислових електричних мережах у сучасних економічних умовах / Є. І. Гудко, О. Д. Демов, Л. Б. Терешкевич // Енергетика и электрификация. – 1997. – № 2. – С. 30–31.
30. Указания по расчету экономической эффективности. Утв. Минэнерго Украины приказом № 1 ПС от 23.02.95 / Министерство энергетики и электрификации. – К. : [б. в.], 1995. – 51 с.
31. Демов О. Д. Аналіз рентабельності використання конденсаторних установок в промислових електричних мережах. / О. Д. Демов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 1. – С. 101–103.
32. Демов О. Д. Аналіз економічних показників установлення конденсаторних батарей в промислових електричних мережах з урахуванням ринкових умов / О. Д. Демов, Хінді Айман Тахер // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 2. – С. 79–82.
33. Концепція компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака, А. В. Праховник [та ін.] // Енергетика и электрификация. – 2005. – № 6. – С. 23–30.
34. Нанака О. М. Формування умов оптимальності компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец 05.09.03 «Електротехнічні комплекси і системи» / О. М. Нанака. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2011. – 12 с.
35. Демов О. Д. Оптимізація процесу впровадження компенсуювальних установок в розподільних електричних мережах енергопостачальних компаній : монографія / О. Д. Демов. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 98 с.

36. Демов О. Д. Планування електроспоживання промислових підприємств та управління ним : монографія / О. Д. Демов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 103 с.
37. Кириленко О. В. Балансуючий ринок електроенергії України та його математична модель / О. В. Кириленко, І. В. Блінов, Є. В. Парус // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 36–43.
38. Баркан Л. Д. Автоматическое управление режимом батарей конденсаторов / Л. Д. Баркан. – М.: Энергия, 1978. – 112 с.
39. Ильяшов В. П. Автоматическое регулирование мощности КУ / В. П. Ильяшов. / – М. : Энергия, 1977. – 247 с.
40. Демов А. О. Використання оперативного надлишку реактивної потужності конденсаторних установок промислових підприємств для компенсації реактивних навантажень розподільчих мереж / А. О. Демов, О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський // Энергетика и электрификация. – 2004. – № 2. – С. 2–5.
41. Ожеховский Т. О регулировании реактивной мощности синхронных двигателей на промышленных предприятиях / Т. Ожеховский, Л. С. Родина // Электричество. – 1990. – № 7. – С. 61–64.
42. Вознюк С. І. Способи та системи оптимального сумісного керування синхронними двигунами та батареями конденсаторів / С. І. Вознюк, Б. С. Рогальський, В. М. Непейвода / Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 2. – С. 47–53.
43. Лежнюк П. Д. Взаємовплив електричних мереж і систем / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 122 с.
44. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей / Н. А. Мельников – М. : Энергия, 1972. – 231 с.
45. Коефіцієнти розподілу втрат, як інструмент для розрахунку економічного еквіваленту реактивної потужності / В. М. Пірняк, П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, О. В. Слободянюк // Новини енергетики. – 2012. – № 9. – С. 34–37.
46. Демов О. Д. Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності на основі коефіцієнтів розподілу втрат // О. Д. Демов, О. В. Слободянюк, В. М. Пірняк, П. Д. Лежнюк // КУСС-2012 : між-нар. наук.-техн. конф. : тези допов. – Вінниця, 2012 – С. 168.
47. Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності для вузлів електричної мережі [Електронний ресурс] / В. М. Пірняк, П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк // Електронний журнал «Наукові праці Вінницького національного університету». – 2013. – № 3. – Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/370/368>.



48. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз / Д. Б. Банін, О. С. Яндульський, М. Д. Банін [та ін.] // Промелектро. – 2004. – № 1. – С. 22–33

49. Демов О. Д. Аналіз методів еквівалентування мереж енергосистеми при розрахунку компенсації реактивної потужності / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, А. В. Савчук // Промелектро, 2006. – № 6. – С. 45–48.

50. Демов О. Д. Спрощення системного підходу до розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, А. В. Савчук // Промелектро. – 2008. – № 6. – С. 14–16.

51. Демов О. Д. Еквівалентування мереж енергосистеми при розрахунку компенсації реактивної потужності / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, А. В. Савчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – Т. 1, № 2. – С. 179–181.

52. Особливості впровадження компенсуючих установок в електричні мережі споживачів у сучасних економічних умовах / А. О. Демов, О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський, О. П. Паламарчук // Енергетика і електрифікація. – 2006 рік. – № 2. – С. 12–15.

53. Демов О. Д. Системний розрахунок компенсації реактивної потужності в сучасних економічних умовах / О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський, О. П. Паламарчук // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, 2005. – Вип. 37. – С. 9–13.

54. Про розрахунок економічного еквівалента реактивної потужності / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, І. О. Бандура, Ю. А. Григораши // Промелектро. – 2010. – № 1. – С. 3 – 6.

55. Бандура І. О. Спрощений розрахунок плати за реактивну енергію / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, І. О. Бандура, Ю. А. Григораши // Промелектро. – 2010. – № 2. – С. 9–12.

56. Спрощення методики розрахунку плати за реактивну енергію / О. П. Паламарчук, П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, І. О. Бандура // Новини енергетики. – 2010. – № 2. – С. 31–33.

57. Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 22 февраля 2007 г. № 49 «О порядке расчета значений соотношения потребителя 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). [Электронный ре-

курс] / Министерство промышленности и энергетики РФ. – Режим доступа: <http://kvar.su/prikaz-ministerstva-promyshlennosti-2/>

58. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях / Н. А. Мельников. – М. : Энергия, 1975. – 128 с.

59. Півнюк Ю. Ю. Компенсація реактивної потужності в локальній електричній системі в умовах балансуєчого ринку електроенергії / Ю. Ю. Півнюк, П. Д. Лежнюк // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво». – 2014. – Вип. 25. – С. 131–137.

60. Економічні еквіваленти реактивної потужності як відносні спади напруги / О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк, П. Д. Лежнюк, В. М. Пірняк // Енергетика та електрифікація. – 2013. – № 8. – С. 17–20.

61. Айман Тахер Алі Хінді. Підвищення ефективності впровадження та керування конденсаторними установками в електричних мережах промислових підприємствах : дис. ... канд., техн. наук : 05.14.02 / Хінді Айман Тахер. – Вінниця, 2004 – 128 с.

62. Демов О. Д. Математична модель та алгоритм впровадження конденсаторних установок в електричній мережі промислових підприємств / О. Д. Демов, Хінді Айман Тахер // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2001. – № 421. – С. 7–9.

63. Демов О. Д. Поетапне впровадження конденсаторних установок в електричній мережі промислових підприємств / О. Д. Демов, Хінді Айман Тахер // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 2. – С. 55–58.

64. Лежнюк П. Д. Поетапний розрахунок компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах із використанням відносних спадів напруги / П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – Вип. 30, Т. 2. – С. 108–115.

65. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / С. И. Вершинина, С. И. Гамазин, Ю. М. Голонов [и др.] ; под ред. А. А. Федорова, Г. В. Сербиновского. Кн. 2. – М. : Энергия, 1972. – 528 с.

66. Зайченко Ю. П. Исследование операций. – К. : Выща шк., 1988. – 552 с.

67. А. с. 1837269 (СССР), G05F1/170. Автоматический регулятор конденсаторных батарей / Рогальский Б. С., Демов А. Д., Непейвода В. М., Иванков В. Д. ; заявл. 10.12.90 ; опубл. 30.08.93. Бюл. № 32. – 14 с.

68. Демов О. Д. Використання оперативного надлишку реактивної потужності конденсаторних установок промислових підприємств / О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський, А. М. Волоцький // Вісник ВПІ. – 2004. – № 6. С. 34–37.

69. Демов О. Д. Підвищення ефективності керування дискретними потужностями конденсаторних установок в електричних мережах промислових підприємств / О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський // VIII Міжнародна НТК «КУСС–2005» : збірник матеріалів. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.

70. Демов О. Д. Математична модель та алгоритм керування оперативним надлишком потужності конденсаторних установок промислових підприємств / О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський, А. М. Волоцький // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2005. – № 5. – С. 43–47.

71. Демов О. Д. Математичні моделі керування дискретними потужностями конденсаторних установок в електричних мережах промислових підприємств / О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський // III Всеукраїнська науково-техн. конференція молодих вчених і спеціалістів : тези доповідей. – Кременчуг, 2005. – С. 31.

72. Демов О. Д. Підвищення ефективності керування дискретними потужностями конденсаторних установок в електричних мережах промислових підприємств / О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № .6. – С. 166–170.

73. Демов О. Д. Управление оперативным излишком реактивной мощности конденсаторных установок промышленных предприятий / О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський // Промышленная энергетика. – 2006 рік видання. – № 7. – С. 48–51.

74. Демов О. Д. Додаткове зниження втрат електроенергії в електричних мережах шляхом використання оперативних надлишків конденсаторних установок / О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський, М. П. Свиридов // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2007. – № 2. – С.72–78.

75. Лежнюк П. Д. Компенсація реактивної потужності асинхронних генераторів на малих гідроелектростанціях / П. Д. Лежнюк, О. В. Нікіторович, Жан-П'єр Нгома // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2008. – № 2. – Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/55/55>.

76. Пат. 92012. Україна, МПК G05F1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних батарей асинхронних генераторів / П. Д. Лежнюк, Ю. Ю. Півнюк, О. Д. Демов, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u2014 01876 ; заявл. 25.02.2014 ; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14.

77. Система автоматического и диспетчерского управления конденсаторными установками в электрических сетях промышленных предприятий / Б. С. Рогальский, А. Д. Демов, А. В. Дмитраш, В. М. Непейвода // Промышленная энергетика. – 1990. – № 2. – С. 50–53.

78. А. с. 1259237 (СССР), МКП G051/170. Автоматический регулятор конденсаторных батарей / Б. С. Рогальский, В. М. Непейвода, А. Д. Демов, А. В. Дмитраш ; заявл. 02.05.1985 ; опубл. 23.03.1987, Бюл. № 11.

79. А. с. 1416961(СССР), МКП G05F1/70. Автоматический регулятор конденсаторных батарей / Б. С. Рогальский, А. В. Дмитраш, В. М. Непейвода, А. Д. Демов ; заявл.11.08.1986 ; опубл.15.08.1988, Бюл. № 30.

80. А. с. 1686424 (СССР), МКП G051/170. Автоматический регулятор конденсаторных батарей / Б.С. Рогальский, А. Д. Демов, А. В. Дмитраш, В. Н. Витюк, В. М. Непейвода ; опубл. 1991, Бюл. № 39.

81. А. с. 1446612 (СССР), МКП G051/170. Автоматический регулятор конденсаторных батарей / Б. С. Рогальский, А. Д. Демов, А. В. Дмитраш ; опубл. 1986, Бюл. № 47.

82. Пат. 40043 Україна МПК G05F 1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних установок / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, К. Ю. Риков, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200811789 ; заявл. 03.10.2008 ; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

83. Пат. 40982 Україна МПК G05F 1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних установок / Б. С. Рогальський, О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200815034 ; заявл. 26.12.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

84. Пат. 48266. Україна МПК G05F 1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних установок / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака, О. Д. Демов, І. Чайка, І. В. Вітт, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200909857 ; заявл. 28.09.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.

85. Пат. 98570. Україна МПК G05F 1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних установок / П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u2014 13754 ; заявл. 22.12.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

86. Пат. 111781. Україна, МПК G05F1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних батарей / П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u2016 04473 ; заявл. 22.04.2016 ; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.

87. Пат. 98570. Україна, МПК G05F1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних установок. / П. Д. Лежнюк, Ю. Ю. Півнюк, О. Д. Демов, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u2014 13754 ; заявл. 22.12.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

88. Пат. 117370. Україна, МПК G05F1/70. Автоматичний регулятор конденсаторних установок / П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов,

Ю. Ю. Півнюк, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u2017 00055 ; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12.

89. Рогальский Б. С. Управление мощностью конденсаторных батарей для потребителя с несимметричными нагрузками / Б. С. Рогальский, О. Д. Демов, В. М. Непейвода, В. О. Иванков, А. В. Дмитраш // Изв. Вузов. Электромеханика. – 1989. – № 7. – С. 99–102.

90. Демов А. Д. Определение входных реактивных мощностей для городских потребителей электроэнергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / А. Д. Демов. – К. : Киевск. политехн. ин-т. – 1984. – 140 с.

91. Рогальський Б. С. Автоматичне управління реактивними навантаженнями підприємства групою синхронних двигунів / Б. С. Рогальський, В. М. Непейвода, Хаддад Бассам Туркі // Вісник ВПІ. – 1994. – № 4 (5). – С. 28–33.

92. Реклейтис Г. Оптимизация в технике. В 2-х книгах. Книга 1 / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел ; пер. с англ. к. т. н. В. Я. Алтаева, В. И. Моторина. – М. : Мир, 1986. – 347 с.

93. Пат. 48266. Україна МПК G05F 1/70. Пристрій для автоматичного керування групою синхронних двигунів / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, Ю. В. Григораш, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200909857 ; заявл. 28.09.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.

94. Демов О. Д. Використання сільських електростанцій для зниження втрат електроенергії в електричних мережах / О. Д. Демов, Н. М. Гуменна, О. П. Паламарчук, В. В. Захаров // Енергетика і електрифікація. – № 8. – 2007. – С. 37–40.

95. Демов О. Д. Використання місцевих електростанцій для компенсації реактивної потужності в розподільчих мережах енергопостачальних компаній / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, В. В. Захаров, Н. М. Гуменна // Промелектро. – 2007. – № 3. – С. 23–26.

96. Демов О. Д. Ще раз про доцільність використання місцевих електростанцій для компенсації реактивної потужності в розподільчих мережах енергопостачальних компаній / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, В. В. Захаров, Н. М. Гуменна // Промелектро. – 2008. – № 2. – С. 44–46.

*Наукове видання*

**Демов Олександр Дмитрович  
Півнюк Юрій Юрійович**

**ОПТИМІЗАЦІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ  
ТА ВИКОРИСТАННЯ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК  
У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ**

**Монографія**

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Ю. Півнюком

Підписано до друку 24.05.2018 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 4,62.  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2018-12

Вінницький національний технічний університет,  
ІРВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 65-18-06.

**press.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. Порики, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/411>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>