

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Л. М. Мельничук

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2019

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/511>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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

УДК 621.316.1

Б-91

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 18.10.2018 р.)

Рецензенти:

В. С. Костишин, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

Бурбело, М. Й.

Б-91 Підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах : монографія / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк., Л. М. Мельничук. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 84 с.

ISBN 978-966-641-756-8

Монографія розрахована на широке коло інженерно-технічних працівників та аспірантів, які досліджують проблему підвищення економічної ефективності розподільних мереж та покращення якості електроенергії.

УДК 621.316.1

ISBN 978-966-641-756-8

© М. Бурбело, Ю. Войтюк, Л. Мельничук, 2019

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 4 |
| ВСТУП | 5 |
| РОЗДІЛ 1 МЕТОДИКА ОПЛАТИ ЗА ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ..... | 6 |
| 1.1 Діюча методика оплати за перетікання реактивної електроенергії..... | 6 |
| 1.2 Рекомендації щодо удосконалення методики оплати за реактивну електроенергію..... | 9 |
| 1.3 Висновки до розділу 1..... | 15 |
| РОЗДІЛ 2 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ..... | 16 |
| 2.1 Аналіз ефективності компенсації реактивної потужності за зменшенням втрат електроенергії | 16 |
| 2.2 Оцінювання зменшення втрат електроенергії в розподільних мережах з різкозмінним навантаженням..... | 19 |
| 2.3 Оцінка ефективності компенсації реактивної потужності з використанням СТК..... | 24 |
| 2.4 Оцінка ефективності компенсації реактивної потужності з урахуванням пуску приводних двигунів технологічних агрегатів | 28 |
| 2.5 Висновки до розділу 2..... | 32 |
| РОЗДІЛ 3 ВИБІР ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ..... | 33 |
| 3.1 Вибір інформативних параметрів для керування компенсувальними пристроями | 33 |
| 3.2 Вибір інформативних параметрів для керування симетрувальними пристроями | 41 |
| 3.3 Удосконалення умов керування симетрувальними пристроями за несиметрії напруг | 49 |
| 3.4 Висновки до розділу 3..... | 54 |
| РОЗДІЛ 4 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ ДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ..... | 55 |
| 4.1 Удосконалення систем керування статичними тиристорними компенсаторами | 55 |
| 4.2 Умови керування статичними синхронними компенсаторами..... | 65 |
| 4.3 Висновки до розділу 4..... | 74 |
| ВИСНОВКИ..... | 76 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 78 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун
БСК – батарея статичних конденсаторів
ЕЕРП – економічний еквівалент реактивної потужності
ЕМ – електрична мережа
КП – компенсувальний пристрій
КРП – компенсація реактивної потужності
ЛЕП – лінія електропередачі
СД – синхронний двигун
СТК – статичний тиристорний компенсатор
СП – симетрувальний пристрій
ТРГ – тиристорно-реакторна група
ТРР – тиристорно-регульований реактор
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Одним з основних і найбільш ефективних заходів зменшення втрат електроенергії та підвищення пропускної спроможності розподільних електричних мереж є компенсація реактивної потужності (КРП) [1, 2].

Стимулювання споживачів до ефективної компенсації реактивної потужності здійснюється прогресивною та прозорою системою оплати, удосконалення якої розглядається в розділі 1.

В розділі 2 наведено результати досліджень щодо удосконалення методики оцінювання ефективності застосування пристроїв КРП [3].

Наявність на промислових підприємствах споживачів з різкозмінними несиметричними навантаженнями спричинює певні проблеми з їх електромагнітною сумісністю [4–8]. Це пов'язано з тим, що такі споживачі створюють в електричних мережах коливання та динамічну несиметрію напруг. За таких умов дотримання норм якості напруги в більшості випадків неможливе без пристроїв динамічної КРП. Для забезпечення якості електроенергії в електричних мережах за такими показниками як відхилення, коливання та несиметрія напруг, зокрема, знаходять застосування статичні тиристорні компенсатори СТК [9–17]. Досліджуються ці питання в розділах 3 і 4.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИКА ОПЛАТИ ЗА ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1 Діюча методика оплати за перетікання реактивної електроенергії

В Україні відповідно до діючої «Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії...» [18] оплата за споживання і генерацію реактивної потужності визначається трьома складниками:

$$П = П1 + П2 - П3, \quad (1.1)$$

де П1 – основна оплата; П2 – надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами компенсації реактивної потужності (КРП); П3 – зниження оплати у разі участі споживача в добовому регулюванні режимів споживання реактивної потужності з мережі енергопостачальної організації.

Основну оплату за спожиту і генеровану реактивну електроенергію розраховують за формулами

$$П1 = П1_{\text{сп}} + П1_{\text{ген}}; \quad П1_{\text{сп}} = W_{\text{р.сп}} D \cdot m_0; \quad П1_{\text{ген}} = W_{\text{р.г}} D \cdot k \cdot m_0, \quad (1.2)$$

де $W_{\text{р.сп}}$ – споживання реактивної електроенергії в точці обліку за розрахунковий період; $W_{\text{р.г}}$ – генерування реактивної електроенергії в мережу енергопостачальної організації (ЕО) в точці обліку за розрахунковий період; D – економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП), що характеризує електричну віддаленість споживача; k – коефіцієнт надбавки за генерування (в останній редакції Методики прийнято $k = 1$); m_0 – оптова ринкова ціна на закупівлю електроенергії з оптового ринку електроенергії (ОРЕ) в розрахунковому періоді, грн/кВт·год.

Врахування електричної віддаленості споживачів здійснюється за допомогою економічного еквівалента реактивної потужності (ЕЕРП) D_j , що характеризує втрати активної потужності від реактивного перетікання до точки обліку в розрахунковому режимі (кВт/квар) і розраховується окремо для кожного j -го споживача за формулою

$$D_j = \frac{\Delta P_s^{(1)} - \Delta P_s^{(2)}}{\Delta Q_j} = \frac{\partial \Delta P_s}{\partial Q_j}, \quad (1.3)$$

де $\Delta P_s^{(1)}$, $\Delta P_s^{(2)}$ – сумарні втрати активної потужності в розрахунковій схемі для двох суміжних режимів з реактивним навантаженням відповідно Q_j та $Q_j + \Delta Q_j$, кВт; Q_j – реактивне навантаження j -го споживача підсистеми; ΔQ_j – малий приріст реактивного навантаження j -го споживача підсистеми, квар.

У разі зонного обліку основну оплату за спожиту і генеровану реактивну електроенергію знаходять за формулою

$$\text{П1} = \left(\sum_{i=1}^n W_{\text{р.сп.}i} \cdot k_i + W_{\text{р.г.н}} \cdot k \right) \cdot D \cdot m_0, \quad (1.4)$$

де i – номер зони добового графіка; n – кількість зон добового графіка ЕН ЕО; $W_{\text{р.сп.}i}$ – споживання реактивної енергії в i -й зоні розрахункового періоду; $W_{\text{р.г.н}}$ – генерування реактивної енергії в нічних провалах добових графіків розрахункового періоду; k_i – коефіцієнт диференційованого тарифу для i -ї зони добового графіка.

Надбавку за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами КРП знаходять за формулою

$$\text{П2} = C_{\text{баз}} \cdot \text{П1}_{\text{сп}} \cdot (\text{tg} \varphi - 0,25)^2, \quad (1.5)$$

де $C_{\text{баз}}$ – коефіцієнт стимулювання (в останній редакції Методики прийнято $C_{\text{баз}} = 1$); $\text{tg} \varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності споживача в середньому за розрахунковий період.

Зниження оплати ПЗ за споживання та генерування реактивної електроенергії можливе за умов достатнього оснащення електричної мережі споживача засобами КРП, наявності зонного обліку спожитої і генерованої електроенергії, виконання споживачем добового графіка споживання і генерування електроенергії (обумовлених ЕО) та наявності його оперативного контролю. Графіки споживання і генерації та розміри знижки ПЗ вказуються в Договорі на постачання електроенергії (ДПЕ).

Обчислення надбавки П2 виконується з використанням зони нечутливості, яка обмежена значенням коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}\varphi_{\text{гран}} = 0,25$. Тобто, додаткова оплата П2 за недостатню оснащеність споживача засобами КРП нараховується, якщо $\text{tg}\varphi > 0,25$.

Фактичний коефіцієнт реактивної потужності споживача в середньому за розрахунковий період визначають за формулою

$$\text{tg}\varphi = W_{\text{р.сп}}/W_{\text{а}} \quad (1.6)$$

За відсутності у споживача приладів обліку реактивних перетоків споживана і генерована реактивна електроенергія визначається розрахунковим шляхом. Споживання реактивної електроенергії розраховують за споживаною активною електроенергією з урахуванням нормативного коефіцієнта потужності ($\text{tg}\varphi_{\text{н}}$), який дорівнює 0,8.

Сумарну реактивну електроенергію, генеровану в мережу ЕО, визначають за формулою

$$W_{\text{р.г}} = Q_{\text{ку}} \cdot t_{\text{нр}}, \quad (1.7)$$

де $Q_{\text{ку}}$ – сумарна встановлена потужність конденсаторних установок в електричній мережі споживача, що зафіксована в ДПЕ; $t_{\text{нр}}$ – кількість годин неробочого часу споживача за розрахунковий період.

Якщо споживач має цілодобовий безперервний режим виробництва, то для нього застосовують формулу

$$W_{\text{р.г}} = Q_{\text{кп}} t_{\text{к}} - \text{tg}\varphi_{\text{н}} W, \quad (1.8)$$

де $Q_{\text{кп}} = Q_{\text{ку}} + 0,3 \cdot P_{\text{сд.вв}}$ – сумарна встановлена потужність компенсувальних пристроїв; $P_{\text{сд.вв}}$ – сумарна встановлена потужність високовольтних (6, 10 кВ) синхронних електродвигунів в електричній мережі споживача, що зафіксована в ДПЕ; $t_{\text{к}}$ – календарна кількість годин розрахункового періоду.

В умовах, коли точка обліку електроенергії знаходиться на стороні нижчої напруги силового трансформатора, який є власністю споживача, до спожитої реактивної енергії додаються втрати реактивної електроенергії в силовому трансформаторі, які розраховують за формулою

$$\Delta W_{\text{р.г}} = \Delta Q_{\text{хх}} \cdot t_{\text{к}} + k_3^2 \cdot \Delta Q_{\text{кз}} \cdot t_{\text{р}}, \quad (1.9)$$

де $\Delta Q_{\text{хх}}$, $\Delta Q_{\text{кз}}$ – складові втрат реактивної потужності за даними холо-
стого ходу і короткого замикання силового трансформатора; t_p – кіль-
кість годин роботи споживача за розрахунковий період; k_3 – коефіціє-
нт завантаження силового трансформатора за розрахунковий період
($k_3 = S_{\phi} / S_{\text{ном.т}}$), який розраховують за фактичним споживанням елект-
роенергії:

$$P_{\phi} = W_a / t_p; Q_{\phi} = W_{\text{р.сп}} / t_p; S_{\phi} = \sqrt{P_{\phi}^2 + Q_{\phi}^2}. \quad (1.10)$$

1.2 Рекомендації щодо удосконалення методики оплати за реактивну електроенергію

В [19] запропоновано при нарахуванні оплати за спожиту реакти-
вну електроенергію замінити значення ЕЕРП, застосування якого
вдвічі завищує оплату відносно реальних втрат, на коефіцієнт розпо-
ділення втрат d_j , який розраховують на основі пропорційного розпо-
ділення сумарних втрат активної потужності.

У разі врахування електричної віддаленості споживачів втрати ак-
тивної потужності, що відносять на баланс окремого споживача, ви-
значають за формулою

$$\Delta P_j = \frac{Q_j}{U^2} \sum_{i=1}^n R_{ij} Q_i, \quad j = 1, \dots, n, \quad (1.11)$$

де ΔP_j – втрати активної потужності, що відносять на баланс окремо-
го споживача; U – напруга мережі; Q_j – реактивна потужність відпо-
відно окремого споживача; Q_i – реактивна потужність навантаження
всіх споживачів підсистеми $i = 1, \dots, n$, включаючи j -о споживача; R_{ij} –
елементи матриці вузлових активних опорів розрахункової схеми під-
системи.

З формули (1.11) можна визначити коефіцієнт розподілення втрат
[20]

$$d_j = \frac{1}{U^2} \sum_{i=1}^n R_{ij} Q_i = \mathbf{U}^{-2} \mathbf{R} \mathbf{Q}, \quad j = 1, \dots, n, \quad (1.12)$$

де \mathbf{U}, \mathbf{Q} – вектори напруг і реактивних потужностей споживачів; \mathbf{R} – матриця вузлових активних опорів мережі.

Необхідно відмітити, що $\sum_{j=1}^n \Delta P_j = \Delta P_s$, а отже, застосування кое-

фіцієнта розподілення втрат d_j забезпечує можливість повного відшкодування втрат активної потужності від перетікання реактивної потужності для розрахункового режиму.

Водночас збільшення реактивного навантаження в підсистемі на 1 % викликає збільшення втрат активної потужності на 2 % і більше, що робить неможливим застосування коефіцієнта розподілення втрат для розрахунків за спожити реактивну енергію.

Отже, одним із найбільш важливих питань є побудова такої системи тарифів, в якій повинні бути розділені складові, що відшкодовують витрати електропередавальних організацій в розрахунковому режимі та їх фактичне збільшення, і складові, які збільшують оплату споживачів за неприйняття заходів щодо компенсації реактивної потужності у випадку її надмірного споживання.

Втрати активної потужності, що зумовлені передаванням реактивної потужності j -му споживачу, можна визначити з використанням кусково-лінійної апроксимації для двох ділянок характеристики втрат, що розділені значенням реактивної потужності навантаження, прийнятим для розрахункового режиму. У такому випадку втрати активної потужності, що відносяться на баланс окремого споживача, при пропорційному їхньому розподіленні між споживачами, можна визначити за формулою

$$\Delta P_j = \frac{Q_j}{U^2} \sum_{i=1}^n Q_i R_{ij} + \frac{2\Delta Q_j}{U^2} \sum_{i=1}^n Q_i R_{ij} + \frac{\Delta Q_j}{U^2} \sum_{i=1}^n \Delta Q_i R_{ij}, \quad j = 1, \dots, n, \quad (1.13)$$

де ΔQ_j – приріст реактивної потужності навантаження j -о споживача підсистеми; ΔQ_i – прирости реактивної потужності навантаження усіх споживачів підсистеми $i = 1, \dots, n$, включаючи j -го споживача.

Розрахунок базового режиму для визначення оплати за перетікання реактивної електроенергії можна виконати з використанням активних навантажень споживачів. Це можуть бути помісячні обсяги спо-

живання електроенергії або середні значення активної потужності споживачів. Розрахункові значення реактивних потужностей та їх приростів для окремих споживачів можна визначити за формулами

$$Q_i = P_i \operatorname{tg} \varphi_{\text{Гр}}; \Delta Q_i = P_i \operatorname{tg} \varphi_i - P_i \operatorname{tg} \varphi_{\text{Гр}},$$

де $P_i, \operatorname{tg} \varphi_i$ – фактичні значення активної потужності та коефіцієнта реактивної потужності.

Для вибору розрахункового режиму можна використати граничне значення коефіцієнта реактивної потужності $\operatorname{tg} \varphi_{\text{Гр}}$, яке для мереж різних номінальних напруг може бути встановлено індивідуально, наприклад, для мереж 10 кВ це значення може бути прийнятим в діапазоні 0,1...0,15, а для мереж напругою 110 кВ – в діапазоні 0,3...0,4.

Приріст сумарних втрат потужності у разі збільшення відносно розрахункового режиму реактивного навантаження будь-якого споживача ΔQ_j має такий вигляд:

$$\delta P_j = \frac{2\Delta Q_j}{U^2} \sum_{i=1}^n Q_i R_{ij} + \frac{\Delta Q_j}{U^2} \sum_{i=1}^n \Delta Q_i R_{ij}, \quad j = 1, \dots, n, \quad (1.14)$$

де $\delta P_j = \Delta P_s^{(1)} - \Delta P_s^{(2)}$ – приріст сумарних втрат активної потужності в розрахунковій схемі для двох суміжних режимів, які відрізняються приростом реактивної потужності j -го споживача.

Останній вираз можна переписати у такому вигляді:

$$\delta P_j = \Delta Q_j \left(2d_j + \sum_{i=1}^n r_i (\operatorname{tg} \varphi_i - \operatorname{tg} \varphi_{\text{Гр}}) \right), \quad j = 1, \dots, n. \quad (1.15)$$

де r_i – коефіцієнт, який характеризує відношення взаємного вузлового опору R_{ij} споживача до його опору навантаження $R_i = U^2 / P_i$ в розрахунковому режимі $r_i = R_{ij} / R_j = R_{ij} P_i / U^2$, тут P_i – активна потужність навантаження споживача, яка була прийнята для розрахункового режиму.

Втратам активної потужності (1.13) відповідає нарахування оплати за перетікання реактивної електроенергії споживачів за формулою

$$P_j = \left[W'_{Q_{\text{сп.}j}} \cdot d_j + W''_{Q_{\text{сп.}j}} \cdot \left(2d_j + \sum_{i=1}^n r_i (\text{tg } \varphi_i - \text{tg } \varphi_{\text{ГР}}) \right) \right] \cdot c_0, \quad (1.16)$$

де $W'_{Q_{\text{сп.}j}}$, $W''_{Q_{\text{сп.}j}}$ – споживання реактивної електроенергії відповідно в розрахунковому режимі і внаслідок приросту реактивного навантаження відносно розрахункового режиму.

У зв'язку зі складністю врахування останньої складової в [21–25] запропоновано нарахування оплати здійснювати за спрощеною формулою

$$P_j = \left[W'_{Q_{\text{сп.}j}} \cdot d_j + W''_{Q_{\text{сп.}j}} \cdot C_{\text{баз}} \cdot (2d_j + r_j \cdot (\text{tg } \varphi_j - \text{tg } \varphi_{\text{ГР}})) \right] \cdot c_0, \quad (1.17)$$

де r_j – коефіцієнт, який характеризує відношення власного вузлового опору R_{jj} споживача до його опору навантаження $R_j = U^2 / P_j$ в розрахунковому режимі $r_j = R_{jj} / R_j = R_{jj} P_j / U^2$, тут P_j – активна потужність навантаження споживача, яка була прийнята для розрахункового режиму.

Введення коефіцієнта $C_{\text{баз}}$ дозволяє компенсувати додаткові втрати, які кумулятивно зростають у разі перевищення граничного значення коефіцієнта реактивної потужності не одним, а декількома (усіма) споживачами. В мережах 10 кВ з малим значенням $\text{tg } \varphi_{\text{ГР}}$ таке спрощення може призвести до істотних помилок розрахунків.

Більш точно коефіцієнт розподілення втрат r_j , що зумовлені приростами реактивної потужності відносно базового значення, можна визначити аналогічно d_j з формули (1.12) відносно приростів реактивної потужності

$$r_j = \frac{1}{U^2} \sum_{i=1}^n R_{ij} \Delta Q_i = \mathbf{U}^{-2} \mathbf{R} \Delta \mathbf{Q}, \quad j = 1, \dots, n, \quad (1.18)$$

де $\Delta \mathbf{Q}$ – вектор приростів реактивних потужностей споживачів відносно базового режиму.

Розглянемо заступну R -схему мережі напругою 10 кВ (рис. 1.1) з такими параметрами: $P_1 = P_2 = P_3 = 1,0$ МВт, $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0,15$ Мвар, $\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \Delta Q_3 = 0,3$ Мвар, $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ Ом.

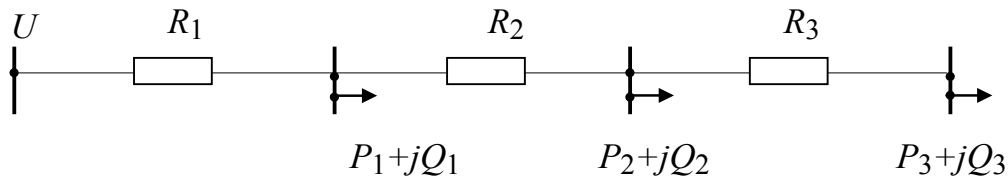


Рисунок 1.1 – Заступна R -схема мережі

Порівняння оплати за спрощеною і уточненою методиками визначення r_j для трьох споживачів вказує на доцільність уточнення, оскільки помилка визначення оплати зменшується до 2,5 %. Залежності оплати за спрощеною (штрихові лінії) і уточненою (суцільні лінії) методикою визначення r_j для трьох споживачів наведені на рис. 1.2.

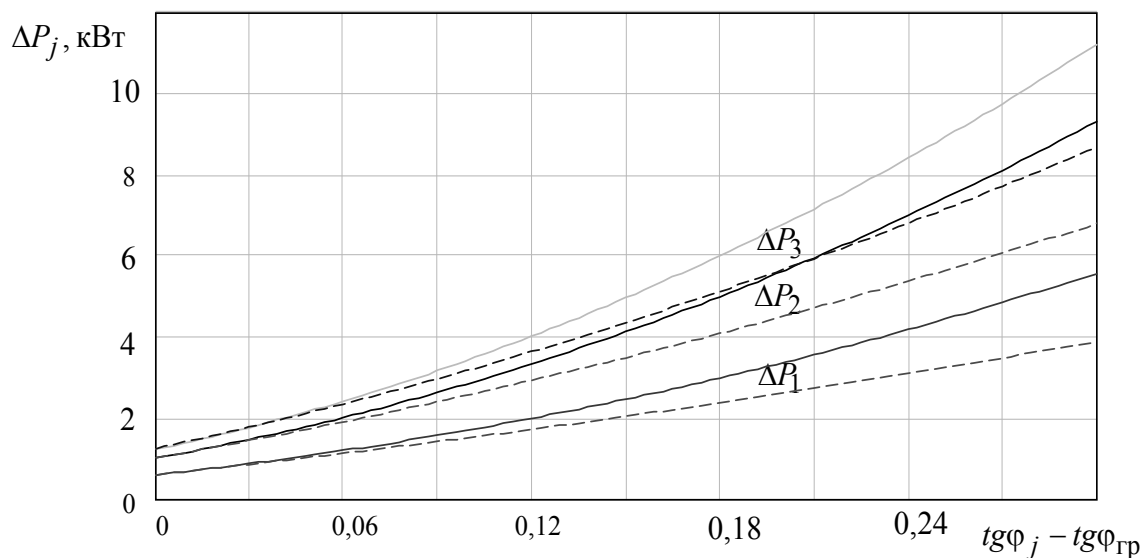


Рисунок 1.2 – Залежності оплати

Залежності оплати за спрощеною і уточненою методикою визначення r_j у разі якщо потужність найбільш віддаленого споживача $P_3 = 0,4$ МВт, $Q_3 = 0,06$ Мвар, $\Delta Q_3 = 0,12$ Мвар наведені на рис. 1.3.

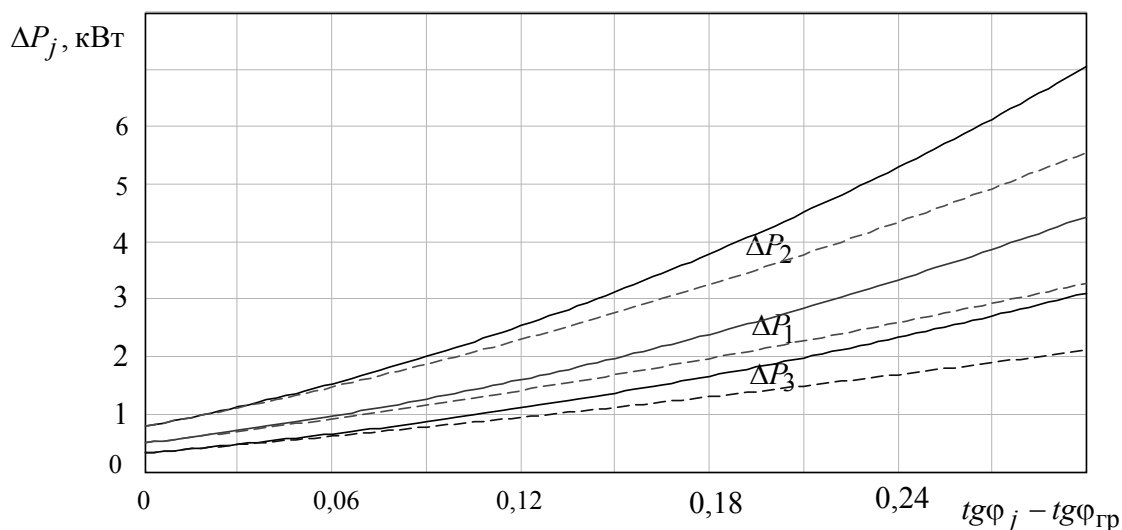


Рисунок 1.3 – Залежності оплати

В табл. 1.1 наведено значення сумарних втрат потужності в мережі 110 кВ, втрат, які відносяться на баланс окремих споживачів, їх сумарні значення, а також відношення сумарних втрат в мережі до суми втрат, розподілених між споживачами, за різних співвідношень реактивних навантажень споживачів.

Таблиця 1.1 – Результати розрахунку збільшення втрат потужності в мережі

| Навантаження споживачів, Мвар | ΔP_{Σ} , кВт | ΔP_1 , кВт | ΔP_2 , кВт | ΔP_3 , кВт | $\sum \Delta P_j$, кВт | $\Delta P_{\Sigma} / \sum \Delta P_j$, в.о. |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--|
| {10, 10, 10} | 193,9 | 41,4 | 69,3 | 83,2 | 193,9 | 1,0 |
| {15, 10, 10} | 239,1 | 86,6 | 69,3 | 83,2 | 239,1 | 1,0 |
| {15, 15, 10} | 323,1 | 86,6 | 146,1 | 83,2 | 315,9 | 1,023 |
| {15, 15, 15} | 439,4 | 86,6 | 146,1 | 177,8 | 410,5 | 1,070 |
| {20, 20, 20} | 786,6 | 139,4 | 238,0 | 295,1 | 672,4 | 1,170 |

З таблиці випливає, що зі збільшенням розрахункового значення реактивної потужності одного із споживачів співвідношення $\Delta P_{\Sigma} / \sum \Delta P_j$ залишається рівним одиниці і поступово збільшується у випадку, якщо навантаження одночасно двох, трьох або більше споживачів перевищують розрахункові значення. Водночас при збільшенні навантажень усіх споживачів на 50 % вказане співвідношення не перевищує 1,1. Аналогічно, при збільшенні навантажень усіх споживачів вдвічі вказане співвідношення не перевищує 1,2. Отже, такі

значення коефіцієнта $C_{\text{баз}}$ дозволяють забезпечити компенсування додаткових втрат, які зростають у разі перевищення граничного значення коефіцієнта реактивної потужності не одним, а декількома (усіма) споживачами.

Звідси також можна зробити висновок, що для споживачів, які живляться від мереж напругою 110 кВ з відносно великим значенням граничного коефіцієнта потужності, значення $C_{\text{баз}}$, можна встановлювати невисоким, наприклад, $C_{\text{баз}} = 1,1$, а для споживачів, які живляться від мереж напругою 10 кВ з відносно малим значенням граничного коефіцієнта потужності, значення $C_{\text{баз}}$ повинно бути більш високим.

Застосування формули (1.17) істотно покращує точність розрахунків оплати за перетікання реактивної електроенергії, робить їх відповідними реальним втратам і прозорими.

1.3 Висновки до розділу 1

Застосування запропонованої методики визначення ЕЕРП з метою обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії забезпечує побудову більш справедливої системи оплати і може бути рекомендовано для удосконалення Методики плати за перетікання реактивної електроенергії між енергопостачальними організаціями та її споживачами.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Аналіз ефективності компенсації реактивної потужності за зменшенням втрат електроенергії

Ефективність компенсації реактивної потужності (КРП) в даний час оцінюється за різними показниками [26–28]. Необхідність в уточненні методики оцінювання ефективності компенсації і похибки розрахунків КРП викликана деякими змінами в нормативних документах і в підходах до розрахунку КРП і керування БСК.

Річний економічний ефект від впровадження оптимальної КРП (включаючи керування БСК) для мереж підсистеми пропонується визначити за формулою [29]

$$E_p = (\dot{Q}_B)^t \cdot \dot{R}_B \cdot \dot{C} \cdot \dot{Q}_B (\Psi_{\Phi}^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_K) - (\dot{Q}_H)^t \cdot \dot{Z}_K \cdot (1 - \Psi_{\text{опт}}) + \Delta Z \quad (2.1)$$

де \dot{Q}_B – вектор реактивних навантажень віток, Мвар;
 $\dot{R}_B = \text{diag}(R_1 \dots R_n)$ – діагональна матриця активних опорів віток мереж підсистеми, Ом; $\dot{C} = \text{diag}(C_{01} / (K_0 \cdot U_1^2) \dots C_{0n} / (K_0 \cdot U_n^2))$ – діагональна матриця коефіцієнтів $C_{0i} / (K_0 \cdot U_i^2)$, тут C_{0i} – питома приведена вартість втрат активної потужності в i -й вітці схеми заміщення мереж підсистеми, грн/кВт; K_0 – питома вартість БСК, грн/кВт; U_i^2 – квадрат напруги i -го вузла, в. о. Ψ_{Φ} – фактичне значення вхідної реактивної потужності в мережах підсистеми до компенсації (або до додаткової компенсації), у в. о.; $\Psi_{\text{опт}}$ – те ж, оптимальне значення; λ_K – коефіцієнт, який враховує зменшення вартості втрат за рахунок зміни конфігурації графіка реактивного навантаження підсистеми після установки БСК, у в. о.; $\dot{Q}_H = (Q_{H1} \dots Q_{Hm})^t$ – вектор реактивних навантажень вузлів мереж підсистеми, Мвар; $\dot{Z}_K = (Z_{K1} \dots Z_{Kn})^t$ – вектор питомих витрат на встановлення БСК для генерування реактивної потужності джерелами у вузлах мережі підсистеми, тис. грн/Мвар; ΔZ – економія зведених витрат при зменшенні навантаження трансформаторів і ЛЕП [27].

Відповідно питомий економічний ефект від впровадження КП потужністю Q_K становитиме $\delta E_p = E_p / Q_K$ або

$$\delta E_p = \left[(\dot{Q}_B)^t \cdot \dot{R}_B \cdot \dot{C} \cdot \dot{Q}_B (\Psi_\Phi^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_K) - (\dot{Q}_H)^t \cdot \dot{Z}_K \cdot (1 - \Psi_{\text{опт}}) + \Delta Z \right] / Q_K. \quad (2.2)$$

Питоме зниження втрат активної потужності (кВт/квар) або економічний еквівалент реактивної потужності $\delta P = \Delta P / Q_K$ після впровадження оптимальної компенсації в мережах підсистеми в розрахунковому режимі

$$\delta P = \frac{10^{-3}}{U^2} \cdot (\dot{Q}_H)^t \cdot \dot{R} \cdot \dot{Q}_H \cdot (\Psi_\Phi^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_K) / Q_K, \quad (2.3)$$

де \dot{R} – матриця вузлових опорів мереж підсистеми.

Питоме зниження втрат активної електроенергії для мереж підсистеми (кВт·год/квар) $\delta W_a = \Delta W_a / Q_K$ за рік після впровадження оптимальної КРП в мережах підсистеми:

$$\delta W_a = \frac{10^{-3} \cdot \tau_{\text{мр}}}{U^2} \cdot (\dot{Q}_H)^t \cdot \dot{R} \cdot \dot{Q}_H \cdot (\Psi_\Phi^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_K) / Q_K, \quad (2.4)$$

де $\tau_{\text{мр}}$ – кількість годин максимальних втрат за реактивною потужністю, (величина $\tau_{\text{мр}}$ визначається з графіка реактивного навантаження після встановлення КП).

Питоме зниження втрат активної електроенергії в мережі живлення за рік пропонується визначити за формулою

$$\delta W'_a = \frac{10^{-3} \cdot Q_M^2 \cdot R_e \cdot \tau_{\text{мр}}}{U^2} \cdot (\Psi_\Phi^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_K) / Q_K, \quad (2.5)$$

де Q_M – максимальне реактивне навантаження, квар; R_e – еквівалентний активний опір мережі, Ом.

Термін окупності капітальних вкладень в БСК (років)

$$T_{\text{ок}} = \frac{E_p}{Z_K \cdot Q_M \cdot (1 - \Psi_{\text{опт}})}. \quad (2.6)$$

Похибки розрахунків, як відомо, можуть бути розділені на дві групи – методичні та інформаційні. Перші зумовлені застосуванням неточних методів розрахунку, інші – неточністю вихідної інформації [26]. У зв'язку з неможливістю точного визначення величин, що розраховуються, в [28] пропонується результат будь-якого інженерного розрахунку представляти в інтервальній формі (у вигляді мінімальних і максимальних можливих значень). Розрахунок і аналіз інтервалів невизначеності економічного ефекту від впровадження тих чи інших заходів дозволяє планувати до першочергової реалізації ті з них, які дають гарантований ефект в умовах невизначеності вихідної інформації.

Однак з огляду на відсутність, як правило, необхідної інформації і складності цих обчислень, пропонується похибку нових методів розрахунку КРП визначати по відношенню до базового (нормативного) методу, яким повинні користуватись проектні та експлуатаційні організації. Умовою зіставлення є сам об'єкт проектування з його вихідними даними.

Похибку нового методу (%) відносно нормативного пропонується визначити за формулами:

$$\begin{aligned} \gamma_{E_p} &= \frac{E_{p.\text{пр}} - E_{p.\text{норм}}}{E_{p.\text{норм}}} \cdot 100; \\ \gamma_{\Delta P} &= \frac{\Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{норм}}}{\Delta P_{\text{норм}}} \cdot 100, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де $E_{p.\text{пр}}$ – річний економічний ефект, який отриманий при розрахунку КРП для даного об'єкта, методом, що пропонується; $E_{p.\text{норм}}$ – теж, нормативним методом; $\Delta P_{\text{пр}}$ – зниження втрат потужності в режимі максимальних навантажень при розрахунку КРП методом, що пропонується; $\Delta P_{\text{норм}}$ – теж, нормативним методом.

Як відомо, нормативні методи розробляються шляхом узагальнення кращих методів розрахунку, розроблених за останній період часу. Тому запропонований підхід може служити своєрідним механізмом удосконалення нормативних методів розрахунку ефективності КРП розподільних мереж споживачів.

2.2 Оцінювання зменшення втрат електроенергії в розподільних мережах з різкозмінним навантаженням

Для оцінювання втрат електроенергії з урахуванням нерівномірності графіків навантажень використано підхід [30–32], який ґрунтується на використанні так званих універсальних графіків навантаження за тривалістю (графіків Россандера) [12, 13], які зображено на рис. 2.1.

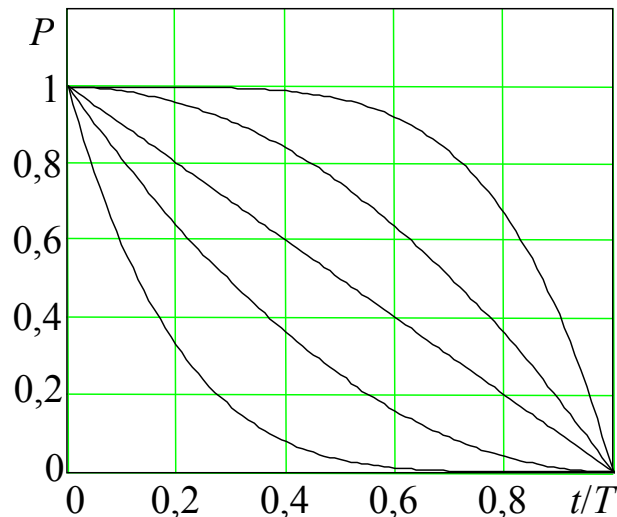


Рисунок 2.1 – Універсальні графіки навантажень за тривалістю

Апроксимація графіків проводиться такими аналітичними залежностями потужності від часу

$$P = P_{\max} - (P_{\max} - P_{\min}) \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{\lambda}, \quad (2.8)$$

$$P = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^{\frac{1}{\lambda}}, \quad (2.9)$$

відповідно, при $\lambda \geq 1$ та $\lambda < 1$.

Коефіцієнт λ розраховується за формулою

$$\lambda = \frac{P_c - P_{\min}}{P_{\max} - P_c}. \quad (2.10)$$

Недоліком є те, що універсальні графіки навантажень характеризуються середнім значенням дисперсії і для різкозмінних навантажень

час максимальних втрат і коефіцієнт форми будуть заниженими. Наприклад, для $\lambda = 1$ значення $\tau_a \approx 0,26 \cdot T_p$; $K_{\phi.a}^2 = 1,05$.

Відомо [3], що компенсація реактивної потужності із застосуванням БСК ефективна лише за наявності відносно рівномірних графіків навантажень. В іншому випадку, застосування БСК призводить до збільшення нерівномірності, що впливає на адекватність оцінювання втрат у випадку застосування універсальних графіків навантажень. Для оцінювання втрат електроенергії в розподільних мережах з різкозмінним навантаженням, використання таких моделей припустиме лише після компенсації реактивної потужності з використанням СТК або СТАТКОМ, які забезпечують вирівнювання графіків навантаження.

Для моделювання добових графіків навантажень поряд з плавно спадними кривими Россандера, які характеризуються середніми значеннями дисперсії, можна рекомендувати плавно спадні симетричні упорядковані графіки навантажень (рис. 2.2) з відповідно великими (див. рис. 2.2а) та малими (див. рис. 2.2б) значеннями дисперсії. Графіки 1, 2, 3 відповідають $\lambda = \{5; 1; 0,2\}$ (значення λ визначається за формулою (2.10)).

Аналітичні вирази для опису кривих з великою дисперсією, зображених на рис. 2.2а, мають вигляд:

$$P = P_c + \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{2} \cdot \left((1 - t/T)^\lambda - 1 \right)^{1/3};$$

$$P = P_c - \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{2} \cdot \left(2(t/T)^{1/\lambda} - 1 \right)^{1/3},$$

відповідно, при $\lambda \geq 1$ та $\lambda < 1$.

Аналітичні вирази для опису кривих з малою дисперсією, зображених на рис. 2.2б, мають такий вигляд:

$$P = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \cdot \left(\frac{(1 - 2t/T)^3 + 1}{2} \right)^{1/\lambda};$$

$$P = P_{\max} - (P_{\max} - P_{\min}) \cdot \left(\frac{(2t/T - 1)^3 + 1}{2} \right)^\lambda,$$

відповідно, при $\lambda \geq 1$ та $\lambda < 1$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю. С. Железко. – М. : Энергоиздат, 1981. – 200 с.
2. Ковалев И. Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И. Н. Ковалев – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.
3. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління / Б. С. Рогальський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 236 с.
4. Милях А. Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К. : Наукова думка, 1973. – 219 с.
5. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К. : Наукова думка, 1985. – 268 с.
6. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К. : Наукова думка, 1992. – 240 с.
7. Электромагнитная совместимость потребителей / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк, Ю. Л. Саенко, Н. А. Нойбергер. – М. : Машиностроение, 2012. – 351 с.
8. Кузнецов В. Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В. Г. Кузнецов, Э. Г. Куренный, А. П. Лютый. – Донецк : Донбасс, 2005. – 250 с.
9. Kundur R. Power System Stability and Control / R. Kundur. – New York : McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
10. Mathur, R. M. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems / R. M. Mathur and R. K. Varma. – Piscataway : IEEE Press, 2002. – 518 p.
11. Кочкин В. И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий / В. И. Кочкин О. П. Нечаев. – М. : НИЦ ЭНАС, 2002. – 248 с.
12. Варецький Ю. О. Компенсація несиметрії статичними компенсаторами в мережах живлення змінних навантажень / Ю. О. Варецький // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 2. – С. 66–70.
13. Варецький Ю. О. Режимы электрических сетей и систем электропоставки с статическими тиристорными компенсаторами (методология анализа) : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.14.02. / Ю. О. Варецький. – Львів, 1999. – 35 с.

14. Корнилов Г. П. Средства и перспективы управления реактивной мощностью крупного металлургического предприятия / Г. П. Корнилов, А. А. Николаев, А. Ю. Коваленко // Электротехника. – 2008. – № 5. – С 25–32.

15. Николаев А. А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. ???? / А. А. Николаев – Магнитогорск, 2009. – 20 с. <http://tekhnosfera.com/view/10225/a?#?page=17>

16. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутризаводского электроснабжения / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, В. С. Ивекеев [и др.] // Машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 59–69.

17. Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів : монографія / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 104 с.

18. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії. Наказ № 431 від 27.06.2017. – Київ : Міненерговугілля України, 2017.

19. 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. – 2004. – № 4. – С. 44–51.

20. Бурбело М. Й. Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах : монографія / М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 110 с.

21. Визначення плати за передавання реактивної електроенергії з використанням квадратичного розподілення втрат активної потужності між споживачами / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук, С. А. Мусійчук // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2011. – № 1. – С. 38–41.

22. Мельничук Л. М. Механізми удосконалення системи оплати за передавання реактивної електроенергії / Л. М. Мельничук // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 3. – С. 101–105.

23. Мельничук Л. М. Удосконалення системи оплати за передавання реактивної електроенергії / Л. М. Мельничук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 1. – С. 180–183.

24. Мельничук Л. М. Визначення економічного еквівалента реактивної потужності та механізми його застосування в системі оплати за

передавання реактивної електроенергії / Л. М. Мельничук // Електро-механічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – № 1. – С. 95–101.

25. Мельничук Л. М. Удосконалення методики оплати за передавання реактивної електроенергії / Л. М. Мельничук // Вісник ВПІ. – 2016. – № 4. – С. 36–40.

26. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат. – 1985. – 224 с.

27. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности // Промышленная энергетика. – 1990. – № 7. – С. 50–55.

28. О направлениях исследований в области компенсации реактивной мощности (дискуссия) // Электричество. – 1981. – № 10. – С. 7–13, С. 61–76. – 1983. – № 5. – С. 58–72.

29. Рогальський Б. С. Економічна ефективність оптимальної компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем та споживачів / Б. С. Рогальський, Ю. П. Войтюк, О. М. Нанака // Динаміка наукових досліджень : матеріали міжнародної наук.-практ. конференції. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2002. – С. 32–34.

30. Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38–150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних втрат електроенергії. (ГНД 34. 09. 104 – 2003). – К. : Міністерство палива та енергетики України, 2004. – 115 с.

31. Анисимов Л. П. Методика расчета потерь энергии в действующих распределительных сетях / Л. П. Анисимов, М. С. Левин, В. Г. Пекелис // Электричество. – 1975. – № 4. – С. 27–30.

32. Пекелис В. Г. Методика расчета нагрузочных потерь энергии в распределительных сетях / В. Г. Пекелис, Л. П. Анисимов // Электрические станции. – 1975. – № 7. – С. 51–54.

33. Казанцев В. Н. Методы расчета и пути снижения потерь энергии в электрических сетях : учебное пособие / В. Н. Казанцев. – Свердловск : Уральский политехнический институт им. С. М. Кирова, 1983. – 84 с.

34. Клебанов Л. Д. Вопросы методики определения и снижения потерь электрической энергии в сетях / Л. Д. Клебанов – Л. : Изд-во Ленинградского университета, 1973. – 70 с.

35. Бурбело М. Й. Визначення втрат електроенергії в розподільних мережах енергопостачальних компаній / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк // Електро-механічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2011. – № 4. – С. 105–108.

36. Варецький, Ю. О. Регулювання напруги в мережі за допомогою статичного компенсатора / Ю. О. Варецький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 1999. – № 5. – С. 69–73.
37. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учеб. для электроэнергетич. спец. вузов / В. А. Веников. – М. : Высшая школа, 1985. – 536 с.
38. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов ; под ред. Л. А. Жукова. – М. : Энергия, 1979. – 456 с.
39. Бурбело, М. Й. Оптимальне за швидкодією керування компенсаційними пристроями за різкого зниження напруги живлення / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 4. – С. 115–118.
40. Аввакумов В. Г. Вопросы качества электрической энергии тяговых подстанций / В. Г. Аввакумов. – Омск : ОМИИТ, 1967. – 87 с.
41. Аввакумов В. Г. Технично-економічна оцінка якості електроенергії в промисленості / В. Г. Аввакумов, Г. Л. Багієв, Д. М. Воскобойников. – Л. : ЛГУ, 1977. – 132 с.
42. Аввакумов В. Г. Методи нескаларної оптимізації і їх призначення / В. Г. Аввакумов. – К. : Вища школа, 1990. – 188 с.
43. Бурбело, М. Й. Оптимальне за швидкодією керування компенсаційними симетрувальними пристроями / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк // Гірничі електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. Дніпропетровськ НГУ. – 2012. – Вип. 88. – С. 3–5.
44. Бурбело, М. Й. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, О. В. Бабенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2002. – № 2. – С. 92–95.
45. Бурбело, М. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування швидкозмінних навантажень трифазних споживачів / М. Бурбело, О. Бабенко // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2003. – № 5. – С. 25–27.
46. Бурбело, М. Й. Квазірівноважена вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Енергетика і електрифікація. – 2003. – № 9–10. – С. 52–54.
47. Бурбело М. Й. Аналіз умов симетрування навантажень з використанням компенсаційних симетрувальних установок / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Енергетика та електрифікація. – 2009. – № 5. – С. 3–6.
48. Зорін В. В. Оцінка взаємовпливу статичних характеристик вузла навантажень і оптимальних розв'язків математичних моделей змен-

шення несиметрії та відхилень напруг / В. В. Зорін, М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 35–37.

49. Григорьев А. С. Частичная компенсация токов обратной последовательности в трехфазных цепях с несимметричными нагрузками : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.05. – К. : ИЭД АН УССР, 1982. – 207 с.

50. Девятко М. В. Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень в розподільних мережах : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : спец. 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи» – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 20 с.

51. Бурбело М. Й. Аналіз цільових функцій симетрування навантажень за багатократної несиметрії / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 43–47.

52. Бурбело М. Й. Керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень в розподільній мережі [Електронний ресурс] / М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк // Електронний журнал Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 2. – 5 с. – Режим доступу http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012-2.files/12mjbden_ua.pdf.

53. Бурбело, М. Й. Алгоритм керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії в розподільних мережах / М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 6. – С. 58–60.

54. А. с. 1347118 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/18. Устройство для компенсации реактивной мощности / А. Л. Шитов и С. Н. Черевань (СССР). – № 4078485/24-07 ; заявл. 18.06.86 ; опубл. 23.10.87, Бюл. № 39. – 8 с.

55. Пат. 94181. Україна. МПК H02J 3/00. Пристрій для компенсації реактивної потужності трифазного навантаження / М. Й. Бурбело, М. В. Никитенко, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № a201001785 ; заявлено 19.02.10 ; опубл. 11.04.11, Бюл. № 7.

56. Керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних швидкозмінних навантажень / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, Ю. В. Лобода // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : науково-виробничий журнал Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2013. – Вип. 2. – С. 37–43.

57. Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетрувальних установок / М. Й. Бурбело,

М. В. Кузьменко, О. О. Бірюков, О. М. Кінзерська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5 . – С. 35–38.

58. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

59. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54–56.

60. Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних навантажень / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 4. – 7 с.

61. Лоскутов А. Б. Модель многоуровневого каскадного инвертора для компенсации реактивной мощности и мощности искажений в сетях с выпрямительной нагрузкой / А. Б. Лоскутов, Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE. – 2011. – 2(16). – С. 32–38.

62. Алтунин Б. Ю. Имитационная модель системы управления СТАТКОМ для симметрирования сетевых токов / Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский, А. А. Кралин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2012. – № 4(97). – С. 232–236.

63. Кузьмин С. В. Принцип построения и математическое моделирование статического компенсатора реактивной мощности в тяговой сети переменного тока / С. В. Кузьмин // Известия ПГУПС. – 2011. – № 3. – С. 70–77.

64. Singh B. Design and control of a DSTATCOM for power quality improvement using cross correlation function approach / Bhim Singh, Sabha Raj Arya // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2012. – V. 4, No.1. – P. 74–86.

65. Пронин М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов ; под ред. Е. А. Крутякова. – СПб : Электросила, 2003. – 172 с.

66. Бурбело, М. Й. Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою СТАТКОМ / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 139–144.

Наукове видання

**Бурбело Михайло Йосипович
Войтюк Юрій Петрович
Мельничук Людмила Михайлівна**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Л. Мельничук

Системні вимоги:

процесор Pentium; 512 Mb RAM;

Windows XP, 7, 8, 10; Acrobat Reader 6.0+.

Один електронний оптичний диск (CD-ROM); Обсяг даних 1,7 Мб.

Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2019-03

Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,

Інформаційний редакційно-видавничий центр.

Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,

м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.

press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/511>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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