

УДК 621.311

О. Д. Демов, канд. техн. наук, доц.;

О. П. Паламарчук, асп.

АБСОЛЮТНА ТА ВІДНОСНА ДЕКОМПОЗИЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У РОЗРАХУНКАХ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В НИХ

Запропоновано абсолютну та відносну декомпозиції електричних мереж при розрахуванні компенсації реактивної потужності в них. Показано, що абсолютна декомпозиція електричних мереж дозволяє проводити оптимізацію потоків реактивної потужності в живильних мережах без урахування параметрів розподільних. Запропонована відносна декомпозиція, яка базується на розділенні функції втрат активної потужності від перетоків реактивної на дві складові (змінну і незмінну в процесі розрахування), що дозволяє проводити розв'язання задачі компенсації реактивної потужності тільки по змінній складовій і відповідно спростити такий розрахунок.

Вступ

Зменшення втрат електроенергії в електричних мережах можна досягти компенсацією реактивної потужності (КРП) в них. Основою відомих методів розрахування КРП в цих мережах є системний підхід, який базується на проведенні таких розрахунків для всієї електричної мережі одночасно [1, 2]. Розв'язувати задачу в такій постановці складно, оскільки:

1) електрична мережа є ієрархічною за побудовою, в якій її частини можуть приймати рішення відповідно до своїх економічних інтересів окремо від інших частин;

2) розв'язання задачі в цілому потребує значних затрат на збір інформації.

Отже, з однієї сторони, виникають техніко-економічні складності розрахунку КРП одночасно для всієї мережі, а з іншої — частини електричної мережі можуть бути незалежними структурами господарювання [3]. Це спонукає до розділення електричної мережі в ході розв'язання задачі КРП на частини (декомпозиції електричної мережі).

Отже, метою роботи є зниження витрат часу на збирання інформації, необхідної для розрахування КРП в електричних мережах, та спрощення цього розрахування їх декомпозицією.

Критерії декомпозиції електричних мереж у розрахунках компенсації реактивної потужності в них

Основною умовою можливості вказаної декомпозиції є рівність значень функцій критеріїв КРП електричних мереж до і після їх декомпозиції [4]:

$$\alpha_{\Sigma} (Q_{KYl}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (Q_{KYi}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \alpha_{ij} (Q_{KYi}, Q_{KYj}), \quad (1)$$

де $\alpha_{\Sigma} (Q_{KYl})$ — функція критерію КРП для всієї електричної мережі в залежності від значень потужностей компенсуювальних установок (КУ) Q_{KYl} під час розв'язання задачі без декомпозиції; $l = 1, \dots, s$; s — кількість вузлів електричної мережі, в яких установлені КУ; $\alpha_i (Q_{KYi})$ — функція критерію КРП i -ї підсистеми в залежності від установлених в її вузлах потужностей КУ Q_{KYi} ; $i, j = 1, \dots, n$, n — кількість підсистем електричної мережі; $\alpha_{ij} (Q_{KYi}, Q_{KYj})$ — функція критерію взаємовпливу i -ї та j -ї підсистем в залежності від потужностей КУ Q_{KYi} , Q_{KYj} , встановлених в i -й та j -й підсистемах.

Розв'язуючи задачу, за критерій КРП в електричних мережах беремо:

1) максимальне значення зниження втрат активної енергії від перетоків реактивної в електричній мережі;

2) мінімальне значення зведених затрат на передавання і генерування реактивної потужності.

Розглянемо основні положення абсолютної та відносної декомпозиції електричних мереж, розраховуючи КРП в них. Абсолютна декомпозиція електричної мережі в розрахунку КРП полягає у розділенні цієї мережі на частини за відсутності впливу однієї частини на іншу, тобто, коли

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \alpha_{ij} (Q_{КУi}, Q_{КУj}) = 0.$$

Відносна декомпозиція полягає у розділенні мережі на частини за наявності такого впливу.

Абсолютна декомпозиція електричних мереж у розрахунках компенсації реактивної потужності в них

Покажемо можливість абсолютної декомпозиції електричної мережі, відповідно другого критерію КРП. Заступну схему розрахункової мережі показано на рис. 1.

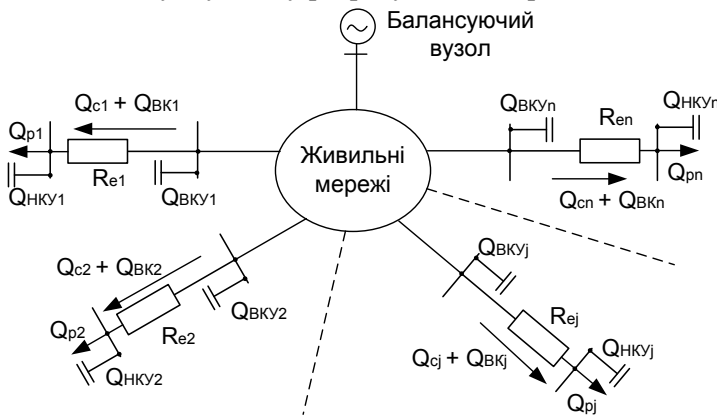


Рис. 1. Заступна схема розрахункової мережі

R_{ej} — значення еквівалентного активного опору розподільчої мережі, яка живиться від j -го вузла живильної мережі; $Q_{ВКУj}$, $Q_{НКУj}$ — значення потужностей, відповідно високовольтих КУ (ВКУ) та низьковольтих КУ (НКУ); Q_{pj} — розрахункове реактивне навантаження j -го вузла живильної мережі; Q_{cj} — значення реактивного потоку, що передається від живильної мережі до j -го навантажувального вузла; $Q_{ВКj}$ — значення реактивної потужності, генерованої j -ю ВКУ.

Оптимальні потоки реактивної потужності відповідають мінімуму функції затрат:

$$Z = \frac{C_0}{U_H^2} \left(\mathbf{Q}_c^t \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{Q}_c + \sum_{j=1}^n R_{ej} (Q_{cj} + Q_{ВКj})^2 \right) + Z_{ВКУ} Q_{ВКj} + Z_{НКУ} (Q_{pj} - Q_{cj} - Q_{ВКj}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

за умови $Q_{ВКj} \geq 0; \quad Q_{НКУj} \geq 0,$ (6)

де \mathbf{R} — матриця вузлових активних опорів живильної мережі; \mathbf{Q}_c — матриця-стовпець потоків реактивних потужностей Q_{cj} ; $Q_{НКУj}$ — значення реактивної потужності, генерованої j -ю НКУ; $Z_{ВКУ}$, $Z_{НКУ}$ — питомі затрати на установлення та експлуатацію відповідно ВКУ та НКУ; C_0 — питома вартість втрат [7].

Продиференціюємо функцію (5) за незалежними змінними Q_{cj} , $Q_{ВКj}$ і отримаємо систему двох лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{2C_0}{U_H^2} \left((Q_{c1}R_{j1} + Q_{c2}R_{j2} + \dots + Q_{cj}R_{jj} + \dots + Q_{cn}R_{jn}) + Q_{cj}R_{ej} + Q_{ВКj}R_{ej} \right) - Z_{НКУ} = 0; \\ \frac{2C_0}{U_H^2} (Q_{cj}R_{ej} + Q_{ВКj}R_{ej}) + Z_{ВКУ} - Z_{НКУ} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Віднімемо, відповідно, праві та ліві частини рівнянь системи (7) і отримаємо:

$$\frac{2C_0}{U_H^2} (Q_{c1}R_{j1} + Q_{c2}R_{j2} + \dots + Q_{cj}R_{jj} + \dots + Q_{cn}R_{jn}) - Z_{ВКУ} = 0. \quad (8)$$

З рівняння (8) знайдемо оптимальне значення Q_{cj} :

$$Q_{cj}^o = \frac{3_{ВКУ} U_H^2}{2R_{jj} C_0} - \frac{Q_{c1} R_{j1}}{R_{jj}} - \frac{Q_{c2} R_{j2}}{R_{jj}} - \dots - \frac{Q_{cn} R_{nj}}{R_{jj}}. \quad (9)$$

З (9) видно, що оптимальний потік реактивної потужності в живильних мережах Q_{cj}^o залежить від параметрів цих мереж та ВКУ, але не залежить від параметрів розподільних мереж. Це справедливо, якщо можливе встановлення ВКУ і виконуються умови (6).

Підставимо значення Q_{cj}^o в друге рівняння системи (7) та знайдемо оптимальне значення $Q_{ВКj}$:

$$Q_{ВКj}^o = \frac{(3_{НКУ} - 3_{ВКУ}) U_H^2}{2R_{ej} C_0} - \frac{3_{ВКУ} U_H^2}{2R_{jj} C_0} + \frac{Q_{c1} R_{j1}}{R_{jj}} + \frac{Q_{c2} R_{j2}}{R_{jj}} + \dots + \frac{Q_{cn} R_{jn}}{R_{jj}}. \quad (10)$$

Сумарний оптимальний потік реактивної потужності, який передається від живильних електричних мереж та ВКУ в j -й навантажувальний вузол визначається як

$$Q_{\Sigma j}^o = Q_{cj}^o + Q_{ВКj}^o;$$

$$Q_{\Sigma j}^o = \frac{(3_{НКУ} - 3_{ВКУ}) U_H^2}{2R_{ej} C_0}. \quad (11)$$

З формули (11) видно, що за виконання умови (6) розрахунок оптимальних потоків реактивної потужності в розподільних мережах можна проводити без урахування параметрів живильних мереж. Іншими словами для розв'язання цієї задачі виконується абсолютна декомпозиція.

Відносна декомпозиція електричних мереж для розв'язання задачі

Розглянемо можливість відносної декомпозиції живильної мережі, рис. 1. Для цього запишемо функцію втрат для цієї мережі:

$$\Delta P = \frac{1}{U_H^2} \cdot \begin{vmatrix} Q_{c1} \\ Q_{c2} \\ \dots \\ Q_{cj} \\ \dots \\ Q_{cn} \end{vmatrix}^t \cdot \begin{vmatrix} R_{11} R_{12} \dots R_{1n} \\ R_{21} R_{22} \dots R_{2n} \\ \dots \\ R_{j1} R_{j2} \dots R_{jn} \\ \dots \\ R_{n1} R_{n2} \dots R_{nn} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Q_{c1} \\ Q_{c2} \\ \dots \\ Q_{cj} \\ \dots \\ Q_{cn} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Аналіз формули (12) показує, що значення втрат, зумовлене реактивними потоками j -го вузла Q_{cj} , може бути записане так:

$$\Delta P_j = \frac{1}{U_H^2} \left(2Q_{cj} (Q_{c1} R_{1j} + Q_{c2} R_{2j} + \dots + Q_{cj-1} R_{j-1j} + Q_{cj+1} R_{j+1j} + \dots + Q_{cn} R_{nj}) + Q_{cj}^2 R_{jj} \right). \quad (13)$$

З формули (13) видно, що величину ΔP_j можна розділити на дві складові: величину втрат, яка зумовлена власне реактивним навантаженням j -го вузла $Q_{cj} (Q_{cj} R_{jj})$, та величину втрат, яка зумовлена накладанням потоків реактивної потужності j -го Q_{cj} та всіх інших вузлів — $\frac{2Q_{cj}}{U_H^2} (Q_{c1} R_{1j} + Q_{c2} R_{2j} + \dots + Q_{cj-1} R_{j-1j} + Q_{cj+1} R_{j+1j} + \dots + Q_{cn} R_{nj})$.

Аналіз функцій (1) та (13) показує, що втрати від накладання (назвемо їх спільними втратами) є функцією критерію впливу одного вузла на інші:

$$\alpha_{dk} (Q_{КУd}, Q_{КУk}) = \Delta P_{dk} (Q_{КУd}, Q_{КУk}),$$

де $Q_{КУd} = Q_{pd} - Q_{cd}$, $Q_{КУk} = Q_{pk} - Q_{ck}$; $\Delta P_{dk} (Q_{КУd}, Q_{КУk})$ — спільні втрати активної потужності, створені реактивним навантаженням d -го та k -го вузлів. У цьому випадку декомпозиція

мережі полягає в розділенні функції спільних втрат активної потужності від перетоків реактивної $\Delta P_{dk}(Q_{KYd}, Q_{KYk})$. Розглянемо це на прикладі розділення цих втрат, створених реактивними навантаженнями споживачів для схеми рис. 2, у випадку, коли встановлення КУ з технічних причин неможливе у другого споживача. Тоді зменшення втрат здійснюється за рахунок установа КУ тільки у першого споживача. У цьому випадку функцію втрат доцільно розділити на дві складові: $\Delta P(Q_{c1})$ — втрати активної потужності, зумовлені реактивним навантаженням першого споживача Q_{c1} , визначаються як: $\Delta P(Q_{c1}) = \frac{2R_{12}}{U_H^2} Q_{c1} Q_{H2} + \frac{Q_{c1}^2 R_1}{U_H^2} + \frac{Q_{c1}^2 R_{12}}{U_H^2}$; $\Delta P(Q_{c2})$ — втрати активної потужності, зумовлені реактивним навантаженням другого споживача Q_{c2} , визначаються

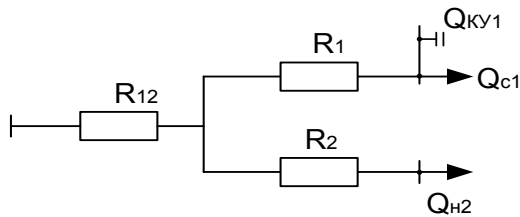


Рис. 2. Заступна схема розрахункової мережі:

R_{12} — значення активного опору живильної мережі;
 R_1, R_2 — еквівалентні активні опори мереж першого та другого споживачів; Q_{H1}, Q_{H2} — реактивне

як:

$$\Delta P(Q_{c2}) = \frac{Q_{H2}^2 R_2}{U_H^2} + \frac{Q_{H2}^2 R_{12}}{U_H^2}.$$

Отримані результати відображають відносну декомпозицію функції втрат активної потужності від перетоків реактивної для мережі, представленої на рис. 2.

Узагальнимо приведену відносну декомпозицію для довільної мережі. Якщо в мережі установа КУ можливе в k вузлах, а в $(n - k)$ вузлах неможливе, то величину втрат можна представити як:

$$\Delta P = \frac{1}{U_H^2} \cdot \begin{vmatrix} \mathbf{Q}_k \\ \mathbf{Q}_{n-k} \end{vmatrix}^t \cdot \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{kk} & \mathbf{R}_{k,n-k} \\ \mathbf{R}_{n-k,k} & \mathbf{R}_{n-k,n-k} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \mathbf{Q}_k \\ \mathbf{Q}_{n-k} \end{vmatrix}, \quad (17)$$

де $\mathbf{R}_{kk} = \begin{vmatrix} R_{k1} \dots R_{k1k} \\ \dots \\ R_{k1} \dots R_{kk} \end{vmatrix}$ — матриця вузлових активних опорів частини мережі, в якій можна встановити КУ;

$\mathbf{R}_{n-k,n-k} = \begin{vmatrix} R_{k+1,k+1} \dots R_{k+1,n} \\ \dots \\ R_{n,k+1} \dots R_{nn} \end{vmatrix}$ — матриця вузлових активних опорів частини мережі, в якій неможливе встановлення КУ;

$\mathbf{R}_{k,n-k} = \begin{vmatrix} R_{1,k+1} \dots R_{1n} \\ \dots \\ R_{k,k+1} \dots R_{kn} \end{vmatrix}$ — матриця взаємних опорів k -го і $(n - k)$ -го вузлів;

$\mathbf{R}_{n-k,k} = \begin{vmatrix} R_{k+1,1} \dots R_{k+1,k} \\ \dots \\ R_{n1} \dots R_{nk} \end{vmatrix}$ — матриця взаємних опорів $(n - k)$ -го і k -го вузлів; \mathbf{Q}_k —

матриця реактивних навантажень вузлів, у яких можна встановити КУ; \mathbf{Q}_{n-k} — матриця реактивних навантажень вузлів, у яких установа КУ неможливе.

У результаті відповідних перетворень отримаємо таку величину втрат:

$$\Delta P = \frac{1}{U_H^2} \left(\mathbf{Q}_k^t \mathbf{R}_{kk} \mathbf{Q}_k + \mathbf{Q}_k^t \mathbf{R}_{k,n-k} \mathbf{Q}_{n-k} + \mathbf{Q}_k^t \mathbf{R}_{n-k,k} \mathbf{Q}_{n-k} + \mathbf{Q}_{n-k}^t \mathbf{R}_{n-k,n-k} \mathbf{Q}_{n-k} \right),$$

де складові $\mathbf{Q}_k^t \mathbf{R}_{kk} \mathbf{Q}_k$ і $\mathbf{Q}_{n-k}^t \mathbf{R}_{n-k,n-k} \mathbf{Q}_{n-k}$ — це є власні втрати вузлів k та $(n - k)$, а складові

$(Q_k^t R_{k,n-k} Q_{n-k})$ і $(Q_k^t R_{n-k,k} Q_{n-k})$ — спільні втрати вузлів k та $(n-k)$. У цьому випадку зменшення втрат здійснюється за рахунок установлення КУ в k вузлах і змінними є втрати $\Delta P_k = \frac{1}{U_H^2} (Q_k^t R_{kk} Q_k + Q_k^t R_{k,n-k} Q_{n-k} + Q_k^t R_{n-k,k} Q_{n-k})$, а складова втрат

$\Delta P_{n-k} = Q_{n-k}^t R_{n-k,n-k} Q_{n-k}$ не змінюється в процесі розрахування і є постійною.

Таким чином, у цьому випадку відносна декомпозиція полягає у розділенні втрат на дві частини: ΔP_k — що змінюються в процесі розрахування КРП в k вузлах, та ΔP_{n-k} — що не змінюються в процесі розрахування КРП в $(n-k)$ вузлах. Розрахунок КРП проводиться шляхом мінімізації тільки ΔP_k , що дозволяє зменшити обсяг розрахункової мережі, і, відповідно, зменшити затрати на збір інформації та розрахунок КРП, порівняно з відомими методами [7].

Приклад

Розглянемо відносну декомпозицію відповідно другого критерію КРП (за мінімумом затрат на передавання та генерування реактивної потужності) на прикладі розрахунку КРП для споживачів розподільчої мережі 10 кВ, заступна схема якої наведена на рис. 3, у разі приєднання нового споживача до одного з вузлів мережі. На схемі показані значення потоків реактивної потужності та реактивних навантажень споживачів в кВАрах і величини активних опорів елементів в Ом, приведені до напруги 10 кВ. Також до шин 10 кВ приєднані інші споживачі з реактивним навантаженням $Q_i = 6059,5$ кВАр. Допустиме відхилення затрат від їх оптимального значення $\varepsilon_d = 0,05$. Питома вартість КУ — 60 грн/кВАр, час найбільших втрат активної енергії для даної мережі $\tau = 2800$ год., тариф на активну енергію $T = 0,23$ грн/кВт·год.

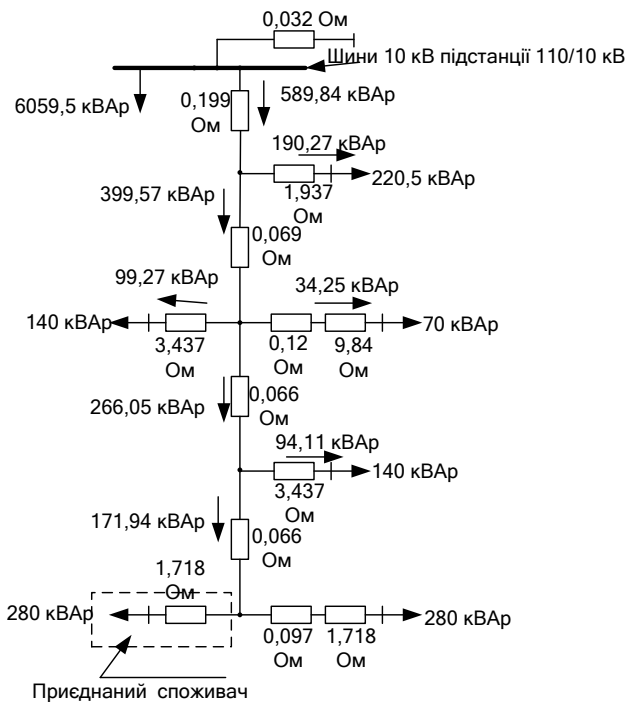


Рис. 3. Заступна схема електричної мережі

Розв’язання

Приєднання нового споживача потребує коригування потоків реактивної потужності усіх споживачів. Але практично такі коригування для всієї мережі реалізувати складно, оскільки це пов’язано з установленням нових секцій КУ або демонтажем частини наявних і потребує додаткових затрат. Тому доцільно проводити коригування потоків реактивної потужності тільки в частині мережі [9]. Відповідно вищесказаного критерій розв’язання задачі можна розділити на дві складові $Z_n = 31 + 32$, де 31 — затрати, що не змінюються в процесі розрахування та 32 — затрати, що змінюються в процесі розрахування. Така декомпозиція затрат дозволяє розв’язувати задачу тільки в частині мережі, якій відповідають змінні затрати 32.

З урахуванням такої декомпозиції розв’язання задачі відповідно до [9] буде таким:

1. Знаходимо значення вхідної реактивної потужності для нового споживача при незмінності потужностей КУ всіх діючих споживачів: $Q_{сн} = 146,63$ кВАр.

2. Розраховуємо 31, 32, та поточне значення затрат Z_n для мережі після приєднання нового споживача: $31 = 13303,72$ грн/рік, $32 = 2225,14$ грн/рік, $Z_n = 13303,72 + 2225,14 = 15528,86$ грн/рік.

3. Визначаємо значення затрат, що відповідає оптимальному розв’язуванню задачі після приєднання нового споживача відповідно до відомих методів:

$$Z_{опт} = 15509,6 \text{ грн/рік.}$$

4. Знаходимо значення відхилення поточних затрат від оптимальних:

$$\xi = \frac{Z_{\text{п}}}{Z_{\text{опт}}} - 1 = \frac{15528,86}{15509,6} - 1 = 0,0012.$$

Оскільки $0,0012 < 0,05$ [8], то у цьому випадку доцільно скористатися декомпозицією електричної мережі і проводити розрахунок КРП тільки в частині мережі.

Висновки

Розв'язуючи задачу компенсування реактивної потужності в електричних мережах доцільно проводити їх декомпозицію, яка полягає в такому:

— розділенні мережі на частини за відсутності впливу реактивних навантажень вузлів мереж однієї частини на втрати активної потужності іншої (абсолютна декомпозиція);

— розділенні функції втрат потужності на дві складові: перша, що змінюється в процесі розрахування КРП, друга, що не змінюється (відносна декомпозиція).

Такий підхід зменшує витрати на збирання інформації, необхідної для розрахунків, та проведення самого розрахунку КРП в електричних мережах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами // Офіційний вісник України. — 1998. — № 1. — С. 174—193. — (Нормативний акт Міністерства Енергетики України).
2. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 200 с.
3. Журавлев В. Г. Применение принципа сокращения схемы для наимыгоднейшего размещения источников реактивной мощности / В. Г. Журавлев, В. Д. Арион // Промышленная энергетика. 1976. — № 4. — С. 36—39.
4. Сингл М. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / М. Сингл, А. Титли ; пер. с англ. А. В. Запорожца — М. : Машиностроение, 1986. — 496 с.
5. Ковалев И. Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И. Н. Ковалев. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 200 с.
6. Зорин В. В. Особенности определения мест установки и мощности батарей конденсаторов в узлах городских сетей / В. В. Зорин, А. Д. Демов // Электрические сети и системы : научно-тех. сб., вып. 16. — Львів : Вища школа, 1981. — С. 58—61.
7. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Ф. Ф. Карпов. — М. : Энергия, 1975. — 184 с.
8. Астахов Ю. Н. Применение критериального метода в электроэнергетике / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк. — К. : УМК ВО, 1989. — 140 с.
9. Демов О. Д. Коригування вхідних реактивних потужностей споживачів з урахуванням економічної стійкості / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук // Технічна електродинаміка. — 2009. — № 5. — С. 44—47.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Надійшла до редакції 2.09.09
Рекомендована опублікування 1.11.09

Демов Олександр Дмитрович — доцент, *Паламарчук Олеся Петрівна* — аспірантка.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет