

# ЕКОНОМІКА ECONOMICS

УДК 621.316

Л. М. Мельничук, канд. екон. наук  
Вінницький національний технічний університет

## МЕХАНІЗМИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОПЛАТИ ЗА ПЕРЕДАВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Діюча в Україні система оплати за перетікання реактивної електроенергії в електричних мережах електропередавальних організацій до промислових та непромислових споживачів оснований на компенсації втрат активної електроенергії. В основу системи оплати покладено економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП). Однак використана в системі оплати функціональна залежність плати від ЕЕРП не відображає фактичних втрат активної електроенергії, що робить розрахунки плати непрозорими. Оскільки у даному випадку здійснюється регулювання у сфері діяльності природних монополій, то визначення плати повинно абсолютно точно компенсувати витрати електропередавальних організацій і точно визначати їх прибуток за надані послуги по передаванню реактивної електроенергії. В статті описано математичні моделі та алгоритми визначення плати за перетікання реактивної електроенергії з використанням пропорційного розподілення втрат між споживачами. Розрахунок ЕЕРП запропоновано здійснювати в залежності від активних навантажень споживачів і граничних значень коефіцієнта реактивної потужності для мереж даного класу напруги.

**Ключові слова:** реактивна потужність, система оплати.

### Розгляд проблеми і постановка завдання

Оскільки питання оплати за перетікання реактивної електроенергії в електричних мережах електропередавальних організацій промисловим та непромисловим споживачам відноситься до регулювання у сфері діяльності природних монополій, то визначення плати повинно абсолютно точно компенсувати витрати електропередавальних організацій і точно визначати їх прибуток за надані послуги по передаванню реактивної електроенергії. Плата повинна ефективно стимулювати споживачів до зменшення споживання реактивної електроенергії. Для цього в ціні повинні бути закладені складові, які відшкодовують витрати електропередавальних організацій і складові, які штрафують споживачів за неприйняття заходів щодо компенсації реактивної потужності у випадку її надмірного споживання. При цьому усі складові плати повинні бути визначеними і доведеними до електропередавальних організацій та споживачів для контролю та ефективного використання.

Плата за передавання реактивної електроенергії промислових та непромислових споживачів відповідно до діючої “Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії...” [1] залежить від їх електричної віддаленості. 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:

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

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;  $\Delta Q_j$  – малий приріст реактивного навантаження  $j$ -го споживача підсистеми, квар.

Плата  $j$ -го промислового або непромислового споживача за спожиту реактивну електроенергію (за відсутності її генерування) визначається за формулою [2]:

$$П_j = W_{Q_{\text{сп.}j}} \cdot D_j \cdot c_0 \cdot \left(1 + C_{\text{баз}} (\text{tg} \varphi_j - \text{tg} \varphi_{\text{гр}})^2\right),$$

де  $W_{Q_{\text{сп.}j}}$  – фактичне споживання реактивної електроенергії;  $c_0$  – прогнозована оптова ринкова ціна на

закупівлю електроенергії з оптового ринку електроенергії (ОРЕ), доведена електропередавальною організацією Постановою НКРЕ для визначення роздрібних тарифів на електричну енергію споживачам в розрахунковому періоді, грн./кВт·год.;  $C_{\text{баз}}$  – нормативний коефіцієнт стимулювання капітальних вкладень у засоби КРП в електричних мережах споживача, прийнятий рівним 1,7;  $\text{tg} \varphi_j$  – фактичне значення коефіцієнта реактивної потужності  $j$ -го споживача, що визначається відношенням фактичного споживання реактивної електроенергії  $W_{Q_{\text{сп.}j}}$  до фактичного споживання активної електроенергії  $W_j$ ;  $\text{tg} \varphi_{\text{гр}}$  – граничне значення коефіцієнта реактивної потужності. Причому друга складова плати, що визначається доданком  $(\text{tg} \varphi_j - \text{tg} \varphi_{\text{гр}})^2$ , враховується якщо  $\text{tg} \varphi_j \geq \text{tg} \varphi_{\text{гр}}$ .

В [3] запропоновано при нарахуванні плати за спожиту реактивну електроенергію замінити значення ЕЕРП, застосування якого вдвічі завищує плату відносно реальних втрат, і, крім того, характеризується складністю та непрозорістю розрахунків, на коефіцієнт розподілу втрат  $d_j$ , який розраховують на основі пропорційного розподілення сумарних втрат активної потужності [4, 5].

У найпростішому випадку (за однакової електричної віддаленості споживачів) втрати активної потужності, що зумовлені реактивним навантаженням окремого споживача, визначають за формулою

$$\Delta P_j = \Delta P_s \frac{Q_j}{Q_s},$$

де  $\Delta P_j$  – втрати активної потужності, що відносять на баланс окремого споживача;  $Q_j$ ,  $Q_s$  – реактивна потужність відповідно окремого споживача та всіх споживачів. У разі врахування електричної віддаленості споживачів втрати активної потужності, що відносять на баланс окремого споживача, використовують матрицю вузлових активних опорів розрахункової схеми підсистеми.

Необхідно відмітити, що

$$\sum_{j=1}^n \Delta P_j = \Delta P_s,$$

а отже, застосування коефіцієнта розподілу 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 розподілу втрат для розрахунків за спожиту реактивну енергію.

В [6] для визначення втрат, що належать окремим споживачам, було запропоновано використання нелінійних розподілень, які забезпечують визначення втрат як в розрахунковому режимі, так і за наявності приросту споживання реактивної електроенергії відносно розрахункового режиму. Однак внаслідок громіздкості розрахунків, такий підхід не може бути однозначно рекомендований для практичного застосування.

#### Матеріали та результати дослідження

Одним із найбільш важливих питань є визначення вихідних даних для розрахункового режиму для визначення ЕЕРП. На наш погляд, в якості базових даних для розрахункового режиму визначення плати за перетікання реактивної електроенергії слід використати активні навантаження споживачів. Це можуть бути помісячні споживання реактивної електроенергії або максимальні значення активної потужності споживачів. Граничне значення коефіцієнта реактивної потужності, яке використовується для стимулюючого регулювання споживачів шляхом збільшення плати у разі істотного перевищення коефіцієнта реактивної потужності, для мереж різних номінальних напруг може бути встановлено індивідуально, наприклад, для мереж 10 кВ це значення може бути прийнятним в діапазоні 0,1...0,15, а для мереж напругою 110 кВ – в діапазоні 0,3...0,4.

Іншим важливим питанням є побудова такої системи тарифів, в якій повинні бути розділені складові, що відшкодовують витрати електропередавальною організацією в розрахунковому режимі та їх фактичне збільшення, і складові, які штрафують споживачів за неприйняття заходів щодо компенсації реактивної потужності у випадку її надмірного споживання.

Втрати активної потужності для розрахункового режиму, які відносять на баланс окремого споживача, можуть бути визначені за формулою

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

де  $U$  – середня експлуатаційна напруга мережі;  $Q_i$  – реактивна потужність навантаження  $i$ -го споживача підсистеми;  $R_{ij}$  – елементи матриці вузлових активних опорів розрахункової схеми підсистеми.

Приріст сумарних втрат потужності у разі збільшення відносно розрахункового режиму реактивного навантаження будь-якого споживача  $\Delta Q_j$  можна подати у такому вигляді:

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

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

Виразивши коефіцієнт розподілу втрат  $d_j$  з формули (1)

$$d_j = \frac{1}{U^2} \sum_{i=1}^n Q_i R_{ij}, \quad j=1, \dots, n, \quad (3)$$

і підставивши в (2), згідно з визначенням ЕЕРП, дістанемо

$$D_j = \lim_{\Delta Q_j \rightarrow 0} \left( 2d_j + \frac{\Delta Q_j}{U^2} R_{jj} \right) = 2d_j, \quad j=1, \dots, n. \quad (4)$$

Сумарні втрати активної потужності, що зумовлені реактивним навантаженням  $j$ -го споживача, можна визначити відповідно (1) – (4) за формулою

$$\Delta P_j = Q_j d_j + \Delta Q_j \left( D_j + \frac{\Delta Q_j}{U^2} R_{jj} \right), \quad j=1, \dots, n. \quad (5)$$

Втратам активної потужності (5) відповідає нарахування плати за перетікання реактивної електроенергії споживачів за формулою:

$$P_j = [W'_{Q_{сп. j}} \cdot d_j + W''_{Q_{сп. j}} \cdot C_{баз} \cdot (D_j + k_j \cdot (\operatorname{tg} \varphi_j - \operatorname{tg} \varphi_{гр}))] \cdot c_0, \quad (6)$$

де  $W'_{Q_{сп. j}}, W''_{Q_{сп. j}}$  – споживання реактивної електроенергії відповідно в розрахунковому режимі і внаслідок приросту реактивного навантаження відносно розрахункового режиму;  $k_j$  – коефіцієнт, який характеризує відношення власного вузлового опору  $R_{jj}$  споживача до його активного опору навантаження  $R_j = U^2 / P_j$  в розрахунковому режимі  $k_j = R_{jj} / R_j = R_{jj} P_j / U^2$ , тут  $P_j$  – активна потужність навантаження споживача, яка була прийнята для розрахункового режиму.

Розглянемо заступну  $R$ -схему мережі напругою 110 кВ (рис. 1) з такими параметрами:  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 10$  Мвар,  $R_1 = R_2 = R_3 = 1$  Ом.

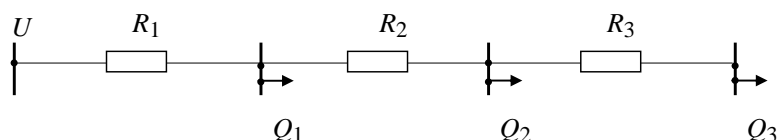


Рис. 1. Заступна  $R$ -схема мережі

Залежності втрат активної потужності та їх оцінок за формулою (6) у разі, якщо  $C_{баз} = 1,3$ , при збільшенні реактивного навантаження окремого споживача наведені на рис. 2. Залежності втрат та їх оцінок позначені відповідно суцільною та штриховою лініями. З наведеного рисунка наглядно видно, що введення коефіцієнта  $C_{баз}$  дозволяє стимулювати споживачів до підвищення рівня компенсації реактивної потужності.

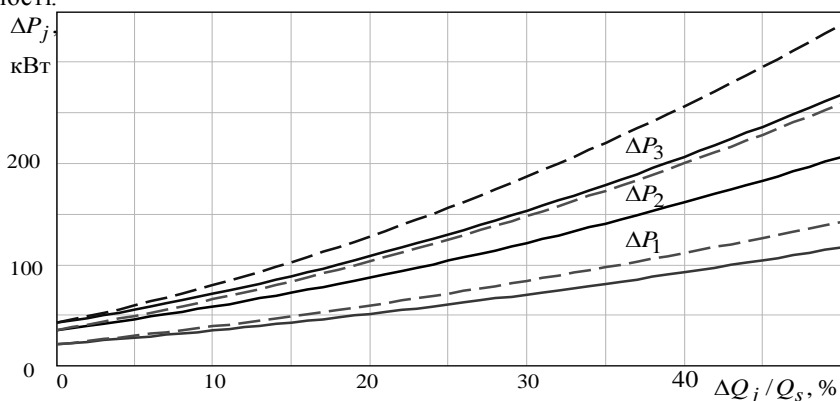


Рис. 2. Залежності втрат потужності та їх оцінок у разі, якщо  $C_{баз} = 1,3$

Значення  $C_{\text{баз}}$  необхідно встановлювати після статистичного обстеження рівня компенсації реактивної потужності для споживачів різних класів напруги і встановлення нормативного рівня рентабельності упровадження засобів компенсації реактивної потужності.

Введення коефіцієнта  $C_{\text{баз}}$  дозволяє також компенсувати додаткові втрати, які кумулятивно зростають у разі перевищення граничного значення коефіцієнта реактивної потужності не одним, а декількома (усіма) споживачами. В таблиці 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

Результати розрахунку збільшення втрат потужності в мережі

Навантаження споживачів, Мвар	$\Delta P_{\Sigma}$ , кВт	$\Delta P_1$ , кВт	$\Delta P_2$ , кВт	$\Delta P_3$ , 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 (6) істотно покращує точність розрахунків плати за перетікання реактивної електроенергії, робить їх відповідними реальним втратам і прозорими.

#### Висновки

Застосування запропонованих механізмів забезпечує побудову більш справедливої системи оплати і може бути рекомендовано для використання в Методичці плати за перетікання реактивної електроенергії між енергопостачальними організаціями та її споживачами.

#### Список літератури

1. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України від 17 січня 2002 р. № 19. Зареєстрована в Міністерстві юстиції України 1 лютого 2002 р. за № 93/6381 // Офіційний вісник України. – 2002. – №6.
2. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Проект наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 20 лютого 2012 р.
3. 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.
4. Рогальський Б. С. Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами / Б. С. Рогальський, Л. М. Мельничук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – №1. – С. 38–41.
5. Мельничук Л. М. Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами з урахуванням їх графіків навантажень / Л. М. Мельничук // Енергетика та електрифікація. – 2006. – №5. – С. 19–21.

6. 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.

L. M. Melnychuk

Vinnitsia National Technical University

#### MECHANISMS OF IMPROVEMENT OF PAYMENT FOR TRANSMISSION REACTIVE POWER

*The current system in Ukraine pay for reactive power flow in electrical networks energy-transmission enterprises in the industrial and non-industrial consumers based on compensation of active energy. The basis of payment laid the economic equivalent of reactive power (EERP). However, the system used to pay salaries of functional dependence EERP not reflect the actual losses of active power, making calculations fees opaque. Since in this case the regulation in the sphere of natural monopolies, the board must determine exactly compensate energy-transmission enterprises and accurately determine their income for services rendered by reactive power. The article deals mathematical models and algorithms for determining payment for reactive power flow based using the proportional distribution of losses among consumers. Calculation EERP proposed to implement depending on the active consumer loads and boundary values of reactive power for a given voltage class networks.*

**Keywords:** reactive power, payment system.

1. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine (2002) *Methods of calculating payment for reactive energy flow between energy-transmission enterprise and its customers*, *Oficiyniy visnik Ukraini*, no 6, Kiev.

2. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine (2012) *Methods of calculating payment for reactive energy flow between energy-transmission enterprise and its customers*, Kiev.

3. Rogalsky B. S. and Nanaka O. M. (2004), “On the use of economic equivalents of reactive energy to determine payment for reactive energy flow between energy-supply enterprises and their customers”, *Promislova elektroenergetika ta elektrotehnika*, no. 4, pp. 44-51 .

4. Rogalsky B. S. and Melnychuk L. M. (2004), “Determination and distribution of power loss between consumers”, *Visnik Vinnickogo politechnichnogo institutu*, no. 1, pp. 38-41 .

5. Melnychuk L. M. (2006), “Determination and distribution of power loss between consumers based on their load graphs”, *Visnik Vinnickogo politechnichnogo institutu*, no. 5, pp. 19-21 .

6. Burbelo M. J., Biryukov O. O., Melnychuk L. M. and Musiychuk S. A. (2011), “Determination of fees for the transfer of reactive power using a quadratic distribution of active power losses between customers”, *Promislova elektroenergetika ta elektrotehnika*, no. 1, pp. 38-41.

УДК 621.316

Л. М. Мельничук, канд. екон. наук

Винницкий национальный технический университет

#### МЕХАНИЗМ У СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОПЛАТЫ ЗА ПЕРЕДАЧУ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ

*Действующая в Украине система оплаты за потоки реактивной электроэнергии в электрических сетях электропередающих организаций к промышленным и непромышленным потребителям основана на компенсации потерь активной электроэнергии. В основу системы оплаты положен экономический эквивалент реактивной мощности (ЭЭРМ). Однако использованная в системе оплаты функциональная зависимость платы от ЭЭРМ не отражает фактических потерь активной электроэнергии, что делает расчеты платы непрозрачными. Поскольку в данном случае осуществляется регулирование в сфере деятельности естественных монополий, то определение платы должно абсолютно точно компенсировать расходы электропередающих организаций и точно определять их прибыль за предоставленные услуги по передаче реактивной электроэнергии. В статье описаны математические модели и алгоритмы определения платы за потоки реактивной электроэнергии с использованием пропорционального распределения потерь между потребителями. Расчет ЭЭРМ предложено осуществлять в зависимости от активных нагрузок потребителей и предельных значений коэффициента реактивной мощности для данного класса напряжения.*

**Ключевые слова:** реактивная мощность, система оплаты.

Надійшла 28.12.2013

Received 28.12.2013