

УДК 621.316

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОГО ЕКВІВАЛЕНТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА МЕХАНІЗМИ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМІ ОПЛАТИ ЗА ПЕРЕДАВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Л. М. Мельничук

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: burbelolyuda@rambler.ru

Діюча в Україні система оплати за перетікання реактивної електроенергії в електричних мережах електропередавальних організацій до промислових і непромислових споживачів основана на компенсації техніко-економічних витрат, що зумовлені втратами активної електроенергії. В основу системи оплати покладено економічний еквівалент реактивної потужності. Однак використана в системі оплати функціональна залежність плати від нього не відображає фактичних витрат активної електроенергії, що робить розрахунки плати непрозорими. Оскільки в 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. У роботі розглянуто питання забезпечення точності оцінювання витрат активної електроенергії від передавання реактивної електроенергії. Описано математичні моделі та алгоритми визначення плати за перетікання реактивної електроенергії на основі кусочно-лінійної апроксимації з використанням пропорційного розподілення витрат між споживачами. Розрахунок економічного еквівалента реактивної потужності запропоновано здійснювати залежно від активних навантажень споживачів і граничних значень коефіцієнта реактивної потужності для мереж даного класу напруги. Враховано збільшення витрат, що виникають за рахунок їх нелінійності від електроспоживання та кумулятивного їх збільшення у разі перевищення граничного значення коефіцієнта реактивної потужності багатьма споживачами.

Ключові слова: реактивна потужність, система оплати.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И МЕХАНИЗМЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОПЛАТЫ ЗА ПЕРЕДАЧУ РЕАКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Л. М. Мельничук

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: burbelolyuda@rambler.ru

Действующая в Украине система оплаты за перетоки реактивной электроэнергии в электрических сетях электропередающих организаций к промышленным и непромышленным потребителям основана на компенсации технико-экономических затрат, обусловленных потерями активной электроэнергии. В основу системы оплаты положен экономический эквивалент реактивной мощности, однако использованная в системе оплаты функциональная зависимость платы от него 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 работе рассмотрены вопросы обеспечения точности оценивания потерь активной электроэнергии от передачи реактивной электроэнергии. Описаны математические модели и алгоритмы определения платы за перетоки реактивной электроэнергии на основе кусочно-линейной аппроксимации с использованием пропорционального распределения потерь между потребителями. Расчет экономического эквивалента реактивной мощности предложено осуществлять в зависимости от активных нагрузок потребителей и предельных значений коэффициента реактивной мощности для данного класса напряжения. Учтено увеличение потерь, которые возникают за счет их нелинейности от электропотребления и кумулятивного их увеличения в случае превышения предельного значения коэффициента реактивной мощности многими потребителями.

Ключевые слова: реактивная мощность, система оплаты.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Плата за передавання реактивної електроенергії промисловим та непромисловим споживачам відповідно до діючої “Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії...” [1] залежить від їх електричної віддаленості. Урахування електричної віддаленості споживачів здійснюється за допомогою економічного еквівалента реактивної потужності (ЕЕРП) D_j , що характеризує збільшення витрат ак-

тивної потужності від реактивного перетікання до точки обліку в розрахунковому режимі (кВт/квар) і розраховується окремо для кожного j -го споживача за виразом

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

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; ΔQ_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 виразом [2]:

$$P_j = W_{Q_{sp,j}} D_j c_0 \left(1 + C_{baz} (tg \phi_j - tg \phi_{gr})^2 \right),$$

де $W_{Q_{sp,j}}$ – фактичне споживання реактивної електроенергії; c_0 – прогнозована оптова ринкова ціна на закупівлю електроенергії з оптового ринку електроенергії (ОРЕ), доведена електропередавальним організаціям Постановою Національної комісії з питань регулювання електроенергетики (НКРЕ) для визначення роздрібних тарифів на електричну енергію споживачам у розрахунковому періоді, грн./кВт·год.; C_{baz} – нормативний коефіцієнт стимулювання капітальних вкладень у засоби компенсації реактивної потужності (КРП) в електричних мережах споживача, прийнятий рівним 1,7 [2]; $tg \phi_j$ – фактичне значення коефіцієнта реактивної потужності j -го споживача, що визначається відношенням фактичного споживання реактивної електроенергії $W_{Q_{sp,j}}$ до фактичного споживання активної електроенергії W_j ; $tg \phi_{gr}$ – граничне значення коефіцієнта реактивної потужності, для промислових і непромислових споживачів пропонується прийняти рівним 0,25 [2]. Причому друга складова плати, що визначається доданком $(tg \phi_j - tg \phi_{gr})^2$, враховується, якщо $tg \phi_j \geq tg \phi_{gr}$.

У [3] запропоновано при нарахуванні плати за спожиту реактивну електроенергію замінити значення ЕЕРП, застосування якого істотно 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. У найпростішому випадку (за однакової електричної віддаленості споживачів) втрати активної потужності, що зумовлені реактивним навантаженням окремого споживача, визначають за виразом

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

де ΔP_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, визначають за виразом

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

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.

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 електроенергії від перетікання реактивної електроенергії для розрахункового режиму.

Водночас збільшення реактивного навантаження в підсистемі на 1 % відносно прийнятих для розрахункового режиму викликає збільшення втрат активної потужності на 2 % і більше, що робить неможливим застосування коефіцієнта розподілу втрат для розрахунків за спожиту реактивну електроенергію.

У [4, 5] для визначення втрат, що належать окремим споживачам, було запропоновано використання нелінійних розподілень, які забезпечують визначення втрат як у розрахунковому режимі, так і в разі збільшення споживання реактивної електроенергії відносно розрахункового режиму. Однак унаслідок громіздкості розрахунків такий підхід не може бути однозначно рекомендований для практичного застосування.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Приріст сумарних втрат потужності в разі збільшення реактивного навантаження будь-якого споживача ΔQ_j можна подати в 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 $\delta P_j = \Delta P_s^{(1)} - \Delta P_s^{(2)}$ – приріст сумарних втрат активної потужності в розрахунковій схемі для двох суміжних режимів, які відрізняються приростом реактивної потужності j -го споживача (тут розглядається будь-який за величиною приріст навантаження).

Виразивши коефіцієнт розподілу втрат d_j з виразу (1)

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

і підставивши у (2), згідно з визначенням ЕЕРП, дістанемо:

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

Отже, дійсно ЕЕРП удвічі перевищує коефіцієнт розподілу втрат [3], однак зі збільшенням реактивного навантаження споживача від розрахункового режиму для адекватного врахування збільшення втрат використання ЕЕРП недостатньо.

Втрати активної потужності, що зумовлені передаванням реактивної потужності j -споживачу, можна визначити з використанням кусочно-лінійної апроксимації для двох ділянок характеристики втрат, що розділені значенням реактивної потужності навантаження, прийнятим для розрахункового режиму, за виразом

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

а в діапазоні малих приростів ΔQ_j :

$$\Delta P_j \approx Q_j d_j + \Delta Q_j D_j, \quad j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

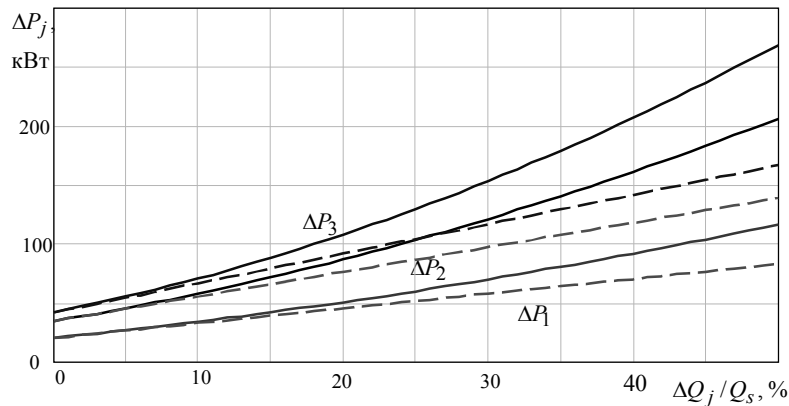


Рисунок 2 – Залежності втрат потужності та їх оцінок за виразом (6)

Отже, у разі застосування (6) необхідно ввести додатковий коефіцієнт, який повинен враховувати приріст реактивної потужності окремих споживачів. Наприклад, можна розглянути варіант використання другої складової плати, що визначається доданком $(tg \phi_j - tg \phi_{gr})^2$, як і в діючій Методичці [1]. У такому випадку нарахування плати за перетікання реактивної електроенергії споживачів може бути визначене за виразом

$$\begin{aligned} \Pi_j = & W'_{Q_{sp,j}} d_j c_0 + W''_{Q_{sp,j}} D_j \times \\ & \times \left(1 + C_{baz} (tg \phi_j - tg \phi_{gr})^2 \right) c_0, \end{aligned} \quad (7)$$

Виникає питання, за яких умов повинен вибиратися розрахунковий режим для визначення ЕЕРП. На наш погляд, для цього слід використати активні навантаження споживачів і граничне значення коефіцієнта реактивної потужності, яке для мереж різних номінальних напруг може бути встановлено індивідуально, наприклад, для мереж 10 кВ це значення може бути прийнятим у діапазоні 0,1–0,15, а для мереж напругою 110 кВ – у діапазоні 0,3–0,4.

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.

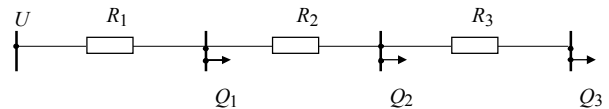


Рисунок 1 – Заступна R -схема мережі

Залежності втрат активної потужності при збільшенні реактивного навантаження окремого споживача наведено на рис. 2. Залежності, розраховані за виразами (5) та (6), позначено, відповідно, суцільною та штриховою лініями. З наведених залежностей випливає, що спрощений вираз (6) справедливий лише за малих значень приростів реактивної потужності відносно розрахункового режиму $\Delta Q_j / Q_s \leq 10\%$.

де $W'_{Q_{sp,j}}, W''_{Q_{sp,j}}$ – споживання реактивної електроенергії відповідно в розрахунковому режимі й унаслідок приросту реактивного навантаження відносно розрахункового режиму.

На рис. 3,а наведено залежності втрат потужності та їх оцінок за виразом (6) з урахуванням $(tg \phi_j - tg \phi_{gr})^2$ відповідно до (7), якщо $C_{baz} = 1$. Похибки апроксимації є досить великими. Не дає бажаного результату й збільшення C_{baz} (рис. 3,б).

Значно кращим є нарахування плати за перетікання реактивної електроенергії споживачів за одним із виразів:

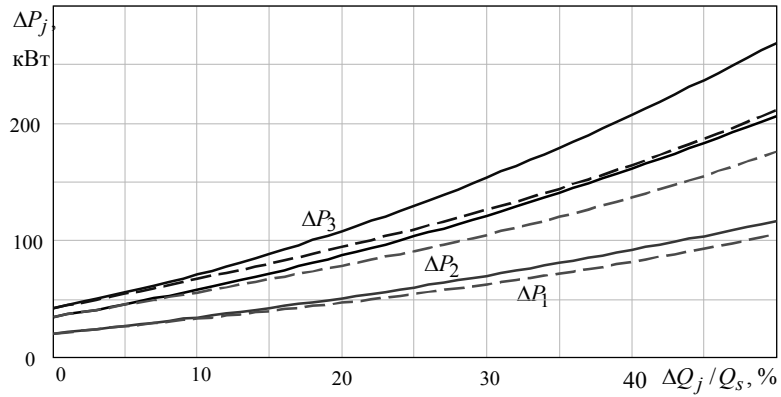
$$P_j = (W'_{Q_{sp,j}} d_j + W''_{Q_{sp,j}} (D_j + \Delta D_j)) c_0; \quad (8)$$

$$P_j = (W'_{Q_{sp,j}} d_j + W''_{Q_{sp,j}} D_j (1 + \delta D_j)) c_0, \quad (9)$$

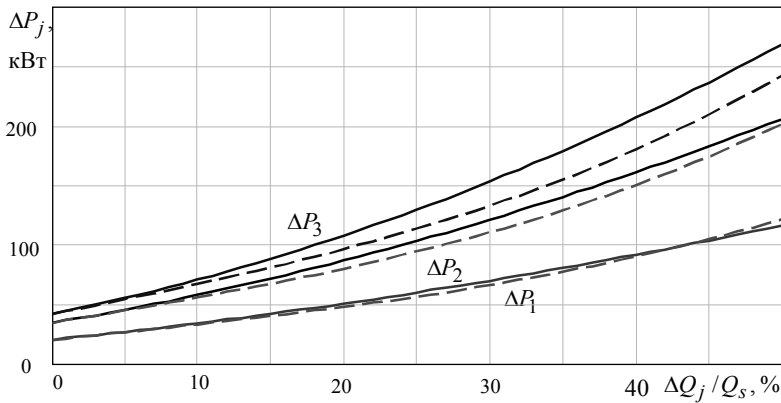
де $\Delta D_j, \delta D_j$ – значення абсолютного та відносного приростів ЕЕРП, які визначаються відповідно за виразами:

$$\Delta D_j = \frac{\Delta Q_j}{U^2} R_{jj}; \quad \delta D_j = \frac{\Delta Q_j R_{jj}}{2 \sum_{i=1}^n Q_i R_{ij}},$$

тобто, по суті, використати вираз (5), який практично точно апроксимує втрати активної потужності від передавання реактивної.



а)



б)

Рисунок 3 – Залежності втрат потужності та їх оцінок за виразом (6)

з урахуванням $(\operatorname{tg} \phi_j - \operatorname{tg} \phi_{gr})^2$ при $C_{baz} = 1$ (а) та $C_{baz} = 1,7$ (б)

Проаналізуємо можливість застосування виразів (8), (9) на прикладі відхідної лінії Ф–45 ПС «Сумівка 110/10 кВ» Бершадських розподільних електромереж (РЕМ) (рис. 4). Даний фідер є типовим для сільських розподільних мереж, що живлять споживачів агропереробних підприємств. Його загальна довжина складає 11,25 км. Навантаження вздовж фідера розподілено нерівномірно.

Значення реактивних потужностей, власних вузлових опорів, коефіцієнта розподілу втрат, ЕЕРП, приростів сумарних втрат активної потужності δP_s , абсолютного та відносного приростів ЕЕРП $\Delta D_j, \delta D_j$ при збільшенні реактивного навантаження окремого споживача на 1% відносно сумарного реактивного навантаження всіх споживачів наведено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, значення коефіцієнта розподілу втрат d_j , що отримані з використанням пропорційного розподілення, не залежать від навантаження окремих споживачів і дійсно можуть бути використані як базові розрахункові значення для нарахування плати за перетікання реактивної електроенергії.

Що стосується абсолютного значення приросту ЕЕРП ΔD_j , то воно легко визначається залежно від електричної віддаленості. Водночас відносно значення приросту ЕЕРП δD_j при збільшенні реактивного навантаження окремого споживача на 1% апроксимувати неможливо внаслідок різної електричної віддаленості та різних реактивних потужностей споживачів.

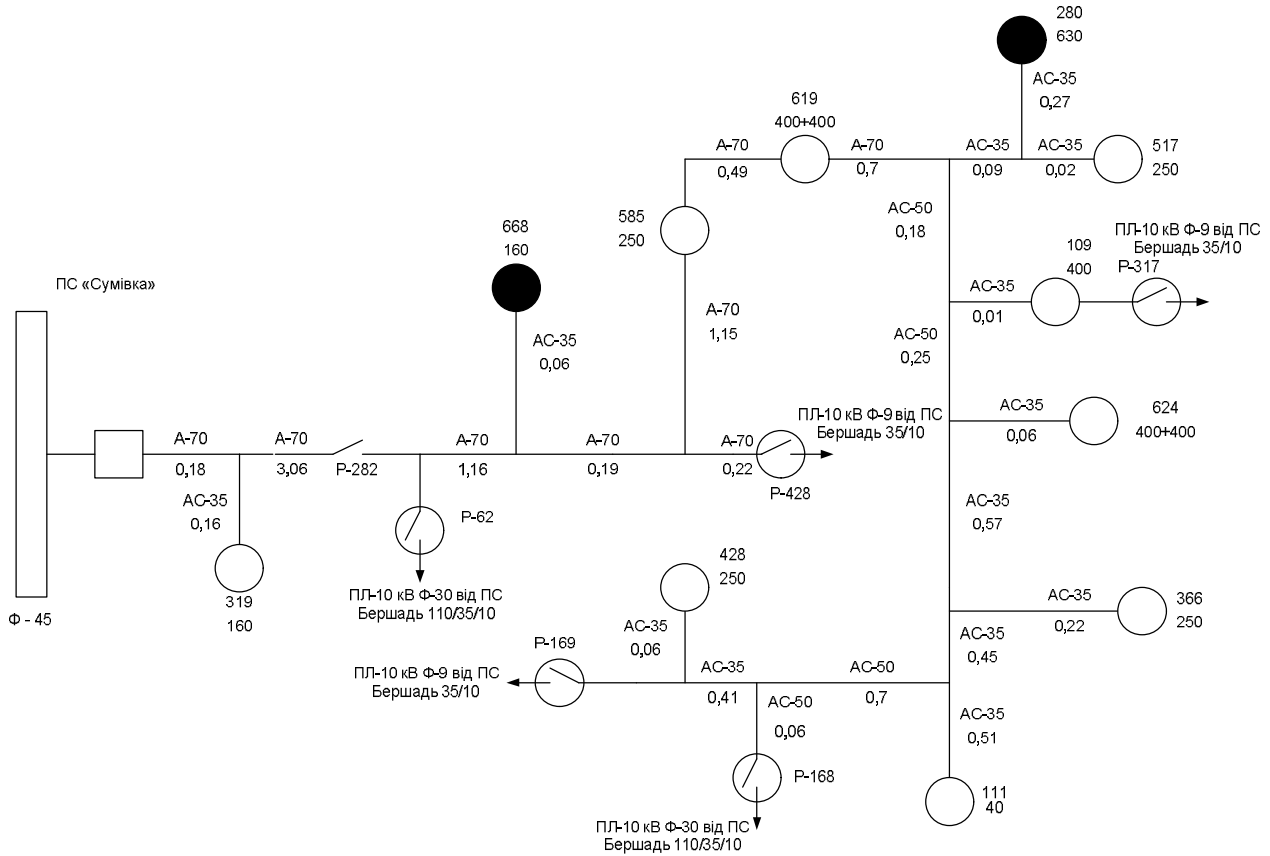


Рисунок 4 – Схема фідера 45 мережі 10 кВ Бершадських електромереж

Таблиця 1 – Результати розрахунку збільшення втрат потужності та абсолютних і відносних приростів значень ЕЕРП у мережі напругою 10 кВ

ТП	Q, квар	R _{jj} , Ом	d _j , кВт/Мвар	D _j , кВт/Мвар	δP _s , %	ΔD _j , кВт/Мвар	δD _j , %
319	21,0	0,202	0,281	0,563	0,064	0,007	1,26
668	21,0	1,825	5,868	11,735	1,543	0,064	0,54
585	102,5	2,317	7,523	15,046	1,982	0,081	0,54
619	22,2	2,515	7,929	15,859	2,090	0,088	0,56
280	63,2	3,088	8,644	17,288	2,281	0,108	0,63
517	18,4	2,887	8,509	17,018	2,248	0,101	0,59
109	67,1	2,908	8,556	17,111	2,257	0,102	0,60
624	5,9	3,089	8,602	17,204	2,270	0,108	0,63
368	13,0	3,679	8,753	17,506	2,312	0,129	0,74
111	3,5	4,276	8,801	17,602	2,328	0,150	0,85
418	12,0	4,543	8,868	17,736	2,347	0,159	0,90

Таким чином, на основі проведених розрахунків можна зробити висновок, що саме вираз (8) краще покласти в основу методики плати за перетікання реактивної електроенергії.

Відповідно до (8) нарахування плати за перетікання реактивної електроенергії споживачів може бути також визначене за виразом

$$P_j = W'_{Q_{sp,j}} d_j c_0 + W''_{Q_{sp,j}} C_{baz} \times (D_j + k_j (tg \phi_j - tg \phi_{gr})) c_0, \quad (10)$$

де k_j – коефіцієнт, який характеризує відношення

власного вузлового опору R_{jj} споживача до його активного опору навантаження R_j = U² / P_j у розрахунковому режимі k_j = R_{jj} / R_j = R_{jj} P_j / U², тут P_j – активна потужність навантаження споживача, яка була прийнята для розрахункового режиму.

На рис. 5 зображено залежності втрат потужності в мережі напругою 110 кВ та їх оцінок за виразом (8) у разі, якщо в неї ввести C_{baz} = 1,3 аналогічно, як це зроблено в (10).

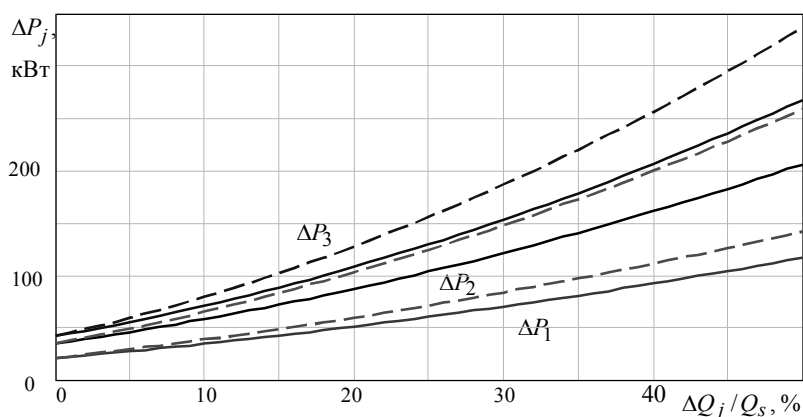


Рисунок 5 – Залежності втрат потужності та їх оцінок за виразом (8) у разі, якщо $C_{baz} = 1,3$

З наведеного рисунка наглядно видно, що введення коефіцієнта C_{baz} дозволяє ефективно стимулювати споживачів до підвищення рівня компенсації реактивної потужності. Для віддалених споживачів надбавка до оплати за реактивну електроенергію буде більш суттєвою, і вона зростатиме зі збільшенням приросту реактивної потужності споживача відносно прийнятого для розрахункового режиму. У разі, якщо навантаження споживача не перевищує розрахункового значення реактивної потужності, що відповідає граничному значенню коефіцієнта реактивної потужності, надбавка до оплати за реактивну електроенергію відсутня.

Значення коефіцієнта C_{baz} необхідно встановлювати єдиним в Україні на основі даних статистичного обстеження рівня компенсації реактивної потужності для споживачів різних класів напруги і встановлення нормативного рівня рентабельності упровадження засобів компенсації реактивної потужності.

Уведення C_{baz} дозволяє також компенсувати додаткові втрати, які кумулятивно зростають у разі перевищення граничного значення коефіцієнта реактивної потужності не одним, а декількома (усіма) споживачами.

Застосування виразу (10) істотно покращує точність розрахунків плати за перетікання реактивної електроенергії, робить їх відповідними до реальних втрат і прозорими.

ВИСНОВКИ. Застосування запропонованої методики визначення ЕЕРП з метою обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії забезпечує побудову більш ефективної та справедливої системи оплати й може бути рекомендовано для використання при вдосконаленні Методики плати за перетікан-

ня реактивної електроенергії між енергопостачальними організаціями та її споживачами.

ЛІТЕРАТУРА

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., Нанак О.М. Про використання економічних еквівалентів реактивної потужності для визначення плати за перетікання реактивної електроенергії між енергопостачальними компаніями і їх споживачами // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2004. – № 4. – С. 44–51.
4. Бурбело М.Й., Мельничук Л.М. Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах: монографія. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008. – 110 с.
5. Бурбело М.Й., Бірюков О.О., Мельничук Л.М., Мусійчук С.А. Визначення плати за передавання реактивної електроенергії з використанням квадратичного розподілення втрат активної потужності між споживачами // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2011. – № 1. – С. 38–41.

DETERMINING THE ECONOMIC EQUIVALENT OF REACTIVE POWER AND MECHANISMS OF ITS APPLICATION IN THE PAYMENT OF TRANSMISSION REACTIVE POWER

L. Melnychuk

Vinnitsia National Technical University

vul. Khmelnytske shose, 95, Vinnitsia, 21021, Ukraine. E-mail: burbelolyuda@rambler.ru

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 technical and economic compensation costs due to loss of active energy. The basis of payment laid the economic equivalent of reactive power. However, the system used to

pay salaries of functional dependence the economic equivalent of reactive power the economic equivalent of reactive power 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 with the issue of accuracy evaluation of active power losses from reactive power. The mathematical models and algorithms for determining payment for reactive power flow based on piecewise linear approximation using the proportional distribution of losses among consumers. Calculation of the economic equivalent of reactive power proposed to implement depending on the active consumer loads and boundary values of reactive power for a given voltage class networks. Allowance of losses arising due to their non-linearity of power consumption and their cumulative increase in excess of the limit values of the coefficient of reactive power by many consumers.

Key words: reactive power, payment system.

REFERENCES

1. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine (2002), "Methods of calculating payment for reactive energy flow between energy-transmission enterprise and its customers", *Ofitsiyiny visnik Ukrainy*, no. 6, Kiev. (in Ukrainian)
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", Kiyv. (in Ukrainian)
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. (in Ukrainian)
4. Burbelo, M.J. and Melnichuk, L.M. (2008), *Stimulirovanie umensheniya poter v elektricheskikh setyah* [Promote the energy loss reduction in electric networks], Monograph, Universum–Vinnitsya, Vinnitsya. (in Ukrainian)
5. 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. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 14.01.2014.