



Дорошенко О. І.

ПРО ЕКОНОМІЧНИЙ ЕКВІВАЛЕНТ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У статті запропоновано науково-методичний підхід до визначення економічних втрат споживачів електроенергії від власного реактивного навантаження їх систем електропостачання, який базується на розумінні електроенергії як фізичного явища. При цьому вважається, що робочим інструментом такої системи є її електромагнітне поле, а реактивна електроенергія системи є її внутрішньою енергією і ні до споживачів, ні від них передаватись, фізично, не може.

Ключові слова: електроенергія, електропостачання, реактивне навантаження, економічний еквівалент реактивної потужності.

1. Вступ

Цілком зрозуміло, що поняття економічного еквівалента передбачає наявність певного коефіцієнта подібності між реально існуючими об'єктами, явищами або процесами та їх вартістю у грошовому вимірі. Як відомо з [1], реактивної потужності як товарної продукції електроенергетичної системи (ЕЕС), фізично, бути не може. Але, як фізичне явище, вона спричиняє економічний збиток і споживача, і електроенергетичній системі. Тому розуміння економічного еквівалента її реактивної потужності (ЕЕРП) є актуальним і потребує конкретного роз'яснення.

2. Аналіз літературних даних

За твердженням [2], робочим інструментом ЕЕС є її електромагнітне поле, яке може існувати тільки у її електропружному діелектричному середовищі, що оточує усі її струмоведучі частини. В [3] енергія цього поля представляється енергією поляризації такого середовища одночасною дією на нього напруги і струму провідності струмоведучих частин ЕЕС. За допомогою електричної ємності згаданих частин напруга стискає їх діелектричне середовище (переважно, у поперечному напрямку електропередачі), а струм провідності таких частин, за допомогою їх індуктивності, розтягує своє діелектричне оточення (переважно, у поздовжньому напрямку електропередачі). Таким чином енергію електромагнітного поля електропередачі, як її електричну енергію, можна розкласти у двох напрямках до напрямку електропередачі: поздовжньо (активна складова) та поперечно (реактивна складова). На відміну від активної складової, реактивна складова енергії електромагнітного поля ні до споживачів, ні від них передаватись, фізично, не може. Можливий напрямок її передачі — тільки у середину струмоведучих частин ЕЕС, де електромагнітного поля, через їх не пружне фізичне середовище, бути не може. Але через явище електромагнітної індукції у ньому створюється електрорушійна сила самоіндукції (ЕРС), під дією якої утворюється струм самоіндукції (реактивний струм провідності). Якщо такий струм має індуктивний характер, то загальний струм провідності від генераторів ЕЕС відстає за фазою зміни від напруги, за ємнісного

характеру реактивного струму загальний струм провідності випереджає за фазою напругу будь-якої її точки.

Незважаючи на фізичну відсутність в струмоведучих частинах ЕЕС електромагнітного поля, математично, активні втрати в них від реактивного струму їх провідності можна визначити за відомою формулою, кВт:

$$\Delta P_Q = \frac{Q_P^2}{U^2} R_E \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

де Q_P — розрахункова реактивна потужність електропередачі, що розглядається, квар; U — номінальна напруга електричної мережі, кВ; R_E — еквівалентний активний опір мережі, приведений до її номінальної напруги, Ом.

Таким чином, складається помилкове враження, ніби електроенергія ЕЕС (її активна і реактивна складові) передаються споживачам по її струмоведучих частинах, для яких можна визначити ЕЕРП.

Вперше поняття про ЕЕРП наведено в [4]: «...Економічний еквівалент реактивної потужності численно равен уменьшению потерь активной мощности в сетях при уменьшении реактивной нагрузки на 1 квар...».

З урахуванням формули (1), його значення визначається, кВт/квар:

$$D = \frac{(Q_{P1}^2 - Q_{P2}^2)}{(Q_{P1} - Q_{P2}) \cdot U^2} \cdot R_E \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

де Q_{P1} — розрахункове реактивне навантаження споживачів до застосування його компенсації, квар; Q_{P2} — розрахункове реактивне навантаження споживачів після застосування його компенсації, квар.

Але в діючих нормативних документах України [5–7] нормативне значення ЕЕРП розуміється як еквівалент збитку від перетікання реактивної потужності по струмоведучим частинам з мереж електропостачальних організацій до споживача і визначається за формулою, кВт/квар:

$$D = \frac{\Delta P_Q}{Q_P} = \frac{Q_P^2}{U^2 Q_P} R_E \cdot 10^{-3} = \frac{Q_P}{U^2} R_E \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Такі значення D у згаданих документах розглядається як нормативне у будь-якій точці електричної мережі без урахування її належності, а його чисельне значення в [7] встановлюється у залежності від кількості трансформацій при електропередачі і є таким, що економічно не обґрунтоване.

3. Формування мети і задач дослідження

Метою даної роботи є дослідження ступеня відповідності величини D , визначеного за формулою (3), поняттю норми при визначенні економічності величини реактивного навантаження системи електропостачання будь-якого споживача електроенергії і вироблення науково-методичного підходу при розрахунках економічного для нього значення реактивного навантаження. Одиниця виміру такої норми повинна мати розмірність грн/квар.

У відповідності з [3], задачею дослідження є створення реально-математичної моделі СЕП конкретного споживача ЕЕ, за допомогою якої можна вирішити поставлену задачу.

4. Результати дослідження економічності реактивного навантаження СЕП конкретного споживача ЕЕ

З робіт [8–11] можна бачити, що сьогодні в Україні відсутня єдина точка зору на чітке розуміння поняття про економічний еквівалент реактивної потужності ЕЕС. Таке можна пояснити математичним формалізмом, який має місце в електроенергетиці і відсутністю в згаданих діючих нормативних документах розуміння фізичної сутності електроенергії (ЕЕ).

За твердженням [3], хвилю енергії поляризації електрично пружного діелектричного середовища, яке оточує всі струмоведучі частини системи, можна, умовно, розкласти за переважаючим напрямком дії напруги та струму провідності згаданих частин на їх діелектрик.

Співвідношення між складовими ЕЕ (активна, реактивна, повна), відоме з [3], представлено на рис. 1. Як можна бачити, споживачеві може передаватись тільки активна складова ЕЕ, а її реактивна складова має коливний характер поперечно напрямку електропередачі, є її внутрішньою енергією і споживачам передаватись, фізично, не може.

Але величина реактивного навантаження споживача суттєво впливає на економічність режиму їх активного електроспоживання: збільшення активних втрат; зменшення пропускної спроможності власних електричних мереж (ЕМ) і ЕМ електропередавальних організацій (ЕО); значний вплив на рівні напруги усіх ЕМ. Очевидно, що визначення ЕЕРП, у першу чергу, необхідно проводити при визначенні потужності пристроїв компенсації реактивного навантаження СЕП будь-якого споживача ЕЕ. При цьому, спиратися необхідно на коефіцієнт її реактивної потужності — $\text{tg}\varphi$, в. о.

Принципову схему СЕП умовного споживача ЕЕ наведено на рис. 2, а. Можливу заступну схему, як її реально-математичну модель представлено на рис. 2, б.

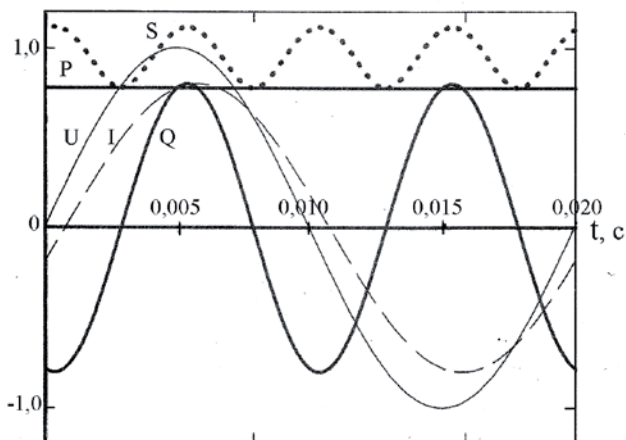


Рис. 1. Складові енергії ЕЕС

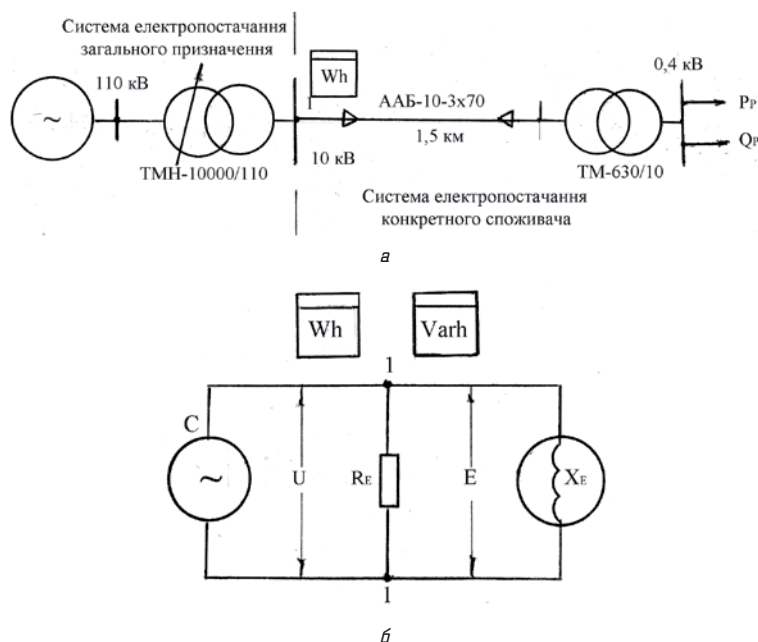


Рис. 2. Система електропостачання умовного споживача: а — принципова сема; б — схема заміщення

При визначенні коефіцієнта реактивної потужності СЕП необхідно брати до уваги той факт, що активна потужність СЕП є діюче значення, а реактивна — амплітудне.

Тому (з урахуванням рис. 1, із [3]), в. о.:

$$\text{tg}\varphi = \frac{Q}{\sqrt{2} \cdot P} = \frac{WQ}{\sqrt{2} \cdot WP}, \quad (4)$$

де WP — активна ЕЕ СЕП за комерційним обліком, кВт·год; WQ — реактивна ЕЕ СЕП за комерційним обліком, квар·год.

При цьому комерційний облік ЕЕ встановлюють у точці розподілу балансової належності ЕМ (1–1).

Як відомо, найбільший економічний вплив реактивне навантаження спричиняє через збільшення втрат активної електроенергії в активних опорах струмоведучих частин СЕП через їх реактивний струм. Потужність таких втрат можна визначити за відомою формулою, кВт:

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_Q = \frac{P^2}{U^2} R_E \cdot 10^{-3} + \frac{Q^2}{U^2} R_E \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

де ΔP_p – потужність активних втрат, що визначається активним навантаженням СЕП, кВт; ΔP_Q – потужність активних втрат, що визначається реактивним навантаженням СЕП, кВт; U – номінальна напруга СЕП, кВ; R_E – еквівалентний умовний активний опір СЕП, приведений до її номінальної напруги, що визначається за відомою формулою, Ом:

$$R_E = \frac{U^2 \cdot 10^3}{P_p}. \quad (6)$$

Приймаючи за одиницю ΔP_p , рівняння (5) можна переписати у вигляді, в. о.:

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P_p}{\Delta P_p} + \frac{\Delta P_Q}{\Delta P_p} = 1 + \frac{Q^2 \cdot R_E \cdot 10^{-3} \cdot U^2}{U^2 \cdot P^2 \cdot R_E \cdot 10^{-3}} = 1 + \text{tg} \varphi^2. \quad (7)$$

Спираючись на формулу (7), нормативний документ [7] у змозі, цілком обґрунтовано, призначити споживачам електроенергії директивне значення коефіцієнта реактивної потужності – $\text{tg} \varphi_D$. Можливі значення такого коефіцієнта наведено в табл. 1.

З урахуванням рівняння (7), графічно залежність активних втрат від реактивного навантаження СЕП представлено на рис. 3. Як можна бачити, негативних значень директивного коефіцієнта реактивного навантаження СЕП конкретних споживачів допускати не можна. Тобто, перекомпенсація реактивного навантаження споживачів (як і його недокомпенсація), економічно, недопустимі.

Як відомо, за вимогою [7], у якості директивного значення для СЕП діючих споживачів ЕЕ приймається значення коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg} \varphi_D = 0,25$ в. о.

Таблиця 1

Можливі значення директивного коефіцієнта $\text{tg} \varphi_D$

$\text{tg} \varphi$, о.е.	ΔP_Q , %	$\cos \varphi$, о.е.	$\text{tg} \varphi$, о.е.	ΔP_Q , %	$\cos \varphi$, о.е.
0,00	0,00	1,000	0,35	12,25	0,944
0,10	1,00	0,995	0,40	16,00	0,928
0,20	4,00	0,981	0,45	20,25	0,912
0,21	4,41	0,979	0,50	25,00	0,894
0,22	4,84	0,977	0,60	36,00	0,857
0,23	5,29	0,974	0,70	49,00	0,819
0,24	5,76	0,972	0,80	64,00	0,781
0,25	6,25	0,970	0,90	81,00	0,743
0,26	6,76	0,968	1,00	100,00	0,707
0,27	7,29	0,965	1,25	156,25	0,625
0,28	7,84	0,963	1,50	225,00	0,555
0,29	8,41	0,960	1,75	306,25	0,496
0,30	9,00	0,958	2,00	400,00	0,447

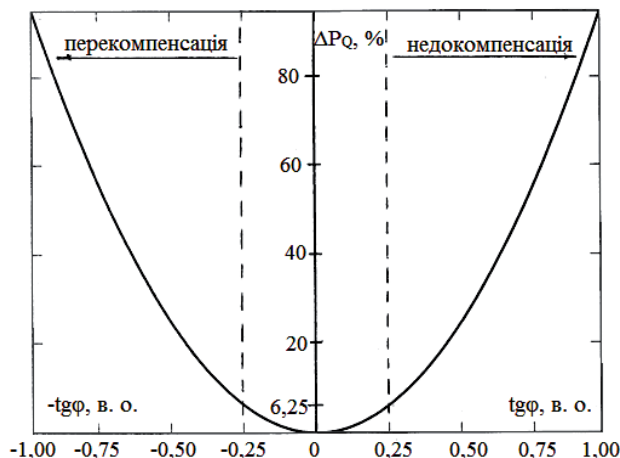


Рис. 3. Залежність $\Delta P_Q = f(\text{tg} \varphi_p)$

Таким чином, для кожного конкретного споживача ЕЕ у розрахунковому періоді, що продовжується T_B годин вмикання, існують такі розрахункові параметри його СЕП:

WP – активна ЕЕ (за комерційним обліком), кВт·год.

WQ – реактивна ЕЕ (за комерційним обліком), квар·год.

CP – плата споживача за активну ЕЕ (з урахуванням ПДВ 20 %), грн.

CeP – плата споживача за активну ЕЕ без урахування вартості її втрат від реактивного навантаження, грн.

$U_{НОМ}$ – номінальна напруга у точці розподілу балансової належності ЕМ споживача та ЕО, кВ.

При цьому, можна визначити наступні параметри СЕП споживача:

Середнє активне розрахункове навантаження споживача, кВт:

$$P_p = \frac{WP}{T_B}. \quad (8)$$

Середнє реактивне розрахункове навантаження споживача, квар:

$$Q_p = \frac{WQ}{\sqrt{2} \cdot T_B}. \quad (9)$$

Середнє розрахункове значення коефіцієнта реактивного навантаження споживача, в. о.:

$$\text{tg} \varphi_p = \frac{Q}{P}. \quad (10)$$

Активний еквівалентний опір СЕП, який визначається за формулою (6).

Очевидно, що рівняння (7) можна представити у вигляді, в. о.:

$$\frac{\Delta P_Q}{\Delta P_p} = \frac{\Delta P_Q \cdot T_B \cdot ce0}{\Delta P_p \cdot T_B \cdot ce0} = \frac{CP}{CeP} = 1 + \text{tg} \varphi^2, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta P_Q}{\Delta P_p} = \frac{\Delta P_Q \cdot T_B \cdot ce0}{\Delta P_p \cdot T_B \cdot ce0} = \frac{CP}{CeP} = 1 + \text{tg} \varphi_p^2,$$

де $ce0$ – питома вартість активної електроенергії, грн/кВт·год.

З рівняння (11) можна визначити вартість активної ЕЕ, грн/рік:

$$CeP_p = \frac{CP}{1 + \operatorname{tg} \varphi_p^2}. \quad (12)$$

При цьому, вартість активних втрат від реактивного навантаження споживача у розрахунковому періоді становить, грн/рік:

$$CeQ = CP - CeP. \quad (13)$$

Директивне значення реактивного навантаження СЕП споживача, квар:

$$Q_d = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_d. \quad (14)$$

Вартість активних втрат ЕЕ від директивного реактивного навантаження споживача, кВт:

$$CeQ_d = CeQ \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_d^2}{\operatorname{tg} \varphi^2}. \quad (15)$$

Очевидно, що ЕЕРП конкретного споживача у розрахунковому періоді можна визначити за формулою, грн/квар · рік:

$$D = \frac{CeQ_p - CeQ_d}{Q_p - Q_d}. \quad (16)$$

У якості прикладу розглянемо СЕП споживача за рис. 1, б, для якого, за час вмикання протягом минулого року — $TB = 8760$ год.:

Активна ЕЕ (за комерційним обліком) — $WP = 186132,0$ кВт · год.

З урахуванням ПДВ = 20 % вартість активної ЕЕ — $CeP = 224192,73$ грн.

Реактивна ЕЕ (за комерційним обліком) — $WQ = 256704,0$ квар · год.

Розрахункова активна потужність споживача, за формулою (8):

$$P_p = \frac{186132,0}{8760} = 21,248 \text{ кВт.}$$

Розрахункова реактивна потужність споживача, за формулою (9):

$$Q_p = \frac{256704,0}{\sqrt{2} \cdot 8760} = 20,721 \text{ квар.}$$

Розрахункове значення коефіцієнта реактивного навантаження споживача, за формулою (10):

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{20,721}{21,248} = 0,975 \text{ в. о.}$$

Еквівалентний активний опір СЕС, визначений за формулою (6):

$$R_E = \frac{6^2 \cdot 10^3}{21,248} = 1694,27711 \text{ Ом.}$$

Вартість активного електроспоживання при розрахунковому навантаженні споживача можна визначити за формулою (12):

$$CeP_p = \frac{224192,73}{1 + 0,995^2} = 114933,79 \text{ грн/рік.}$$

При цьому, вартість реактивної ЕЕ, за формулою (13), становить:

$$CeQ = 224192,73 - 114933,79 = 109258,94 \text{ грн/рік.}$$

Якщо прийняти $\operatorname{tg} \varphi_d = 0,25$ в. о., то за формулою (14):

$$Q_d = 21,248 \cdot 0,25 = 5,312 \text{ квар.}$$

Вартість директивного значення реактивної ЕЕ визначається за формулою (15) і складає величину:

$$CeQ_d = 109258,94 \cdot \frac{0,25^2}{0,975^2} = 7183,36 \text{ грн/рік.}$$

За формулою (16), ЕЕРП споживача складає величину:

$$D = \frac{109258,94 - 7183,36}{20,721 - 5,312} = 6624,41 \text{ грн/рік.}$$

Графік залежності ЕЕРП наведено на рис. 4.

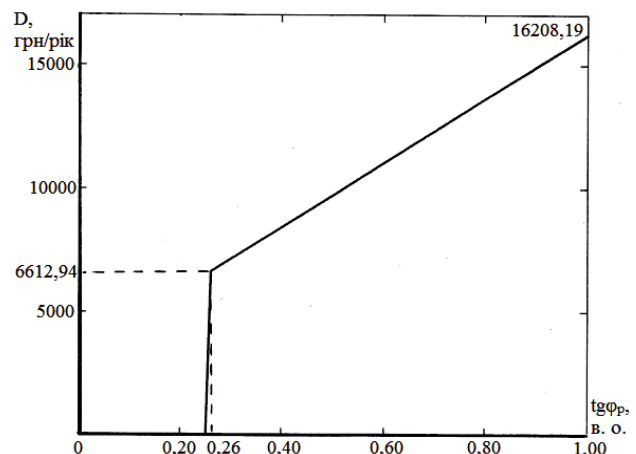


Рис. 4. Залежність $D = f(\operatorname{tg} \varphi_p)$ ЕЕРП конкретного споживача ЕЕ

Як можна бачити, ЕЕРП конкретної СЕП лінійно залежить від коефіцієнта її реактивного навантаження, яке доцільно зменшувати (компенсувати).

5. Висновки

1. В науково-технічній літературі з електроенергетики нема єдиного чіткого обґрунтування фізики розуміння економічного еквівалента реактивної потужності (ЕЕРП) систем електропостачання споживачів електроенергії.

2. Оскільки реактивна електроенергія — це внутрішня енергія системи електропостачання конкретного споживача тільки активної електроенергії, то математичний зв'язок між її активним і реактивним навантаженням можна установити за допомогою коефіцієнта реактивної потужності такої системи.

3. З метою економії активних втрат електроенергії в системі електропостачання загального призначення, в системах електропостачання конкретних споживачів, що її створюють, необхідно встановити єдиний нормативний (директивний) коефіцієнт реактивної потужності.

4. Економічність потужності реактивного навантаження систем електропостачання конкретного споживача, у грошовому еквіваленті, можна оцінити як різницю вартості активних втрат в еквівалентному активному опорі його системи електропостачання від реактивного навантаження — реального і директивного.

5. Середній, протягом року, ЕЕРП у грошовому еквіваленті для системи електропостачання конкретного споживача електроенергії можна визначити від ділення, згаданої різниці на різницю розрахункового і директивного реактивного навантаження споживача.

6. ЕЕРП у грошовому еквіваленті для СЕП конкретного споживача електроенергії може слугувати реальним інструментом для визначення економічності вибору пристроїв компенсації його реактивного навантаження.

Література

- Дорошенко, О. І. Про фізику електромагнітного поля електроенергетичної системи [Текст] / О. І. Дорошенко // Матеріали XI Міжнародної конференції «Фізичні процеси та поля технічних та біологічних об'єктів». — Кременчук, 2012. — С. 33–35.
- Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст]: учеб. / Л. А. Бессонов. — Изд. 6-е. — М.-Л.: Высш. школа, 1973. — 752 с.
- Дорошенко, О. І. Про моделювання електроенергетичних систем [Текст] / О. І. Дорошенко // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2014. — № 5/3(19). — С. 4–8. doi:10.15587/2312-8372.2014.27920
- Литвак, Л. В. Повышение коэффициента мощности на промышленных предприятиях [Текст] / Л. В. Литвак. — Л.: Госэнергоиздат, 1957. — 191 с.
- Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України № 19 від 17.01.2002 // Офіційний вісник України. — 2002. — № 48. — С. 71–147.
- СОУ-Н МПЕ 40.1.20.510.:2006. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача) [Текст]. — Київ, 2006. — 48 с.
- Методика визначення нераціонального (неефективного) використання паливно-енергетичних ресурсів [Текст]: Наказ Національного агентства України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів. — Київ, 2009. — 13 с.
- Банін, Д. Б. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз [Текст] / Д. Б. Банін, О. С. Яндульський, М. Д. Банін, А. М. Боднар, А. В. Гнатівський // Промелектро. — 2004. — № 1. — С. 22–33.
- Рогальський, Б. С. Про використання економічних еквівалентів реактивної потужності для визначення плати за перетікання реактивної електроенергії між енергопостачальними компаніями і їх споживачами [Текст] / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Промелектро. — 2004. — № 4. — С. 44–51.
- Рогальський, Б. С. Економічні еквіваленти реактивної потужності (ЕЕРП) та їх використання [Текст] / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Вісник ВПП. — 2005. — № 6. — С. 126–129.
- Демов, О. Д. Про розрахунок економічного еквівалента реактивної потужності [Текст] / О. Д. Демов, Ю. А. Григораш, О. П. Паламарчук, І. О. Бандура // Промелектро. — 2010. — № 2. — С. 3–7.
- Дорошенко, О. І. Щодо питання «економічності» економічного еквівалента реактивної потужності [Текст] / О. І. Дорошенко // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. — Кременчук: КрНУ, 2014. — Вип. 1(2). — С. 249–251.

ОБ ЭКОНОМИЧЕСКОМ ЭКВИВАLENTE РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье предложен научно-методический подход к определению экономических потерь потребителей электроэнергии от собственной реактивной нагрузки их систем электроснабжения, который базируется на понимании электроэнергии как физического явления. При этом предполагается, что рабочим инструментом такой системы является её электромагнитное поле, а реактивная электроэнергия системы есть её внутренней энергией и ни к потребителям, ни от них передаваться, физически, не может.

Ключевые слова: электроэнергия, электроснабжение, реактивная нагрузка, экономический эквивалент реактивной нагрузки.

Дорошенко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електропостачання та енергоменеджменту, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: dai1938@yandex.ua.

Дорошенко Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра электроснабжения и энергоменеджмента, Одесский национальный политехнический университет, Украина.

Doroshenko Oleksandr, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: dai1938@yandex.ua