

---

---

# **ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

---

---

## НЕОБХІДНІСТЬ УПРОВАДЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ

**О. І. Дорошенко, О. М. Івко**

Одеський національний політехнічний університет  
просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65111, Україна. E-mail: dai1938@yandex.ua

Доведено, що для забезпечення загальних мінімальних активних втрат в електроенергетичних системах від реактивного навантаження споживачів необхідно проводити системний розрахунок із застосуванням відомого кібернетичного підходу: від споживачів – до енергопостачальної організації і потім – до споживачів. Наводиться приклад такого розрахунку. Методика системного розрахунку реактивного навантаження систем електропостачання споживачів розглянута на прикладі системи електропостачання загального призначення.

**Ключові слова:** системний розрахунок, кібернетичний підхід, реактивне навантаження.

## НЕОБХОДИМОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

**А. И. Дорошенко, А. Н. Ивко**

Одесский национальный политехнический университет  
просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65111, Украина. E-mail: dai1938@yandex.ua

Доказано, что для достижения общего минимума активных потерь в электроэнергетических системах от реактивной нагрузки потребителей необходимо проводить системный расчет с применением известного кибернетического подхода: от потребителей – к энергопоставляющей организации, после чего – к потребителям. Приводится пример такого расчета. Методика системного расчета реактивной нагрузки систем электроснабжения потребителей рассмотрена на примере системы электроснабжения общего назначения.

**Ключевые слова:** системный расчет, кибернетический подход, реактивная нагрузка.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Як відомо, сучасні електроенергетичні системи (ЕЕС) є великими за розмірами і потужністю та складними за технологією роботи системами. Безумовно, це системи кібернетичного типу з усіма специфічними властивостями, неврахування яких суттєво впливає на стратегію їх розвитку і функціонування [1]: "...Недоучет возможностей и особенностей электроэнергетики как большой системы приводит к ошибочным суждениям и серьезным просчетам...".

Так, наприклад, сучасне орієнтування на структурно-економічне проектування в умовах ринкових відносин в електроенергетиці призвело до ситуації в питаннях компенсації реактивного навантаження електроенергетичних систем, коли виробники, постачальники і споживачі електричної енергії (ЕЕ) розглядають його зі своїх власних позицій [2]. При цьому дискутується питання щодо плати за "реактивну електроенергію" без узгодженого розуміння її фізичної сутності, яке в нормативних документах відсутнє [3].

Розроблено методику підходу до системного розрахунку з визначення величини реактивного навантаження систем електропостачання (СЕП), яка ґрунтується на основі фізико-технологічного аналізу й економічної оцінки перспективи розвитку ЕЕС. Для цього застосовується кібернетичний підхід до моделювання ЕЕС, сутність якого, за визначенням [1], полягає у наступному: "...ход вверх" для побудови моделі верхнього рівня, операцій с этой моделью, и "ход вниз" по уровням иерархии для определения интересующих исследователя внутренних переменных...".

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Як відомо з [4], реактивна енергія ЕЕС є внутрішньою частиною її енергії – поперечною складовою енергії

поляризації пружного діелектричного середовища, яке оточує всі струмоведучі частини цієї системи, тобто енергії її електромагнітного поля. Незважаючи на те, що вона не передається ні споживачам, ні від них, її зменшення в СЕП споживачів пристроями компенсації реактивного навантаження (ПКРН) дає відчутний економічний ефект для всієї ЕЕС.

ПКРН – це електротехнічний пристрій, струм провідності якого випереджає напругу на його затискачах на фазовий кут  $\varphi$ . Як відомо, найбільш економічними є конденсаторні установки (КУ) з номінальною напругою їх конденсаторів 0,4 кВ [5].

Економічно обґрунтоване реактивне навантаження СЕП споживачів, за рекомендацією [6], можна визначити за формулою, квар:

$$Q_E = \frac{500 \Delta p_{KV} U_{NOM}^2}{R_E}, \quad (1)$$

де  $\Delta p_{KV} = \Delta p_{KN} + \Delta p_{KV}$  – питомі активні втрати в конденсаторних установках, які у конденсатора з напругою 0,4 кВ не перебільшують величину  $\Delta p_{KN} = 0,0003$  кВт/квар, а в конденсаторах з напругою 6(10) кВ вони становлять  $\Delta p_{KV} = 0,00015$  кВт/квар;  $U_{NOM}$  – номінальна напруга електричної мережі (ЕМ), кВ;  $R_E$  – еквівалентний опір ЕМ, приведений до номінальної напруги, Ом.

Якщо в СЕП споживача застосовуються КУ з конденсаторами 0,4 6(10) кВ, то середньовиважене значення питомих активних втрат можна визначити за формулою, кВт/квар:

$$\Delta p_{KV} = \frac{Q_{KN} P_{KN} + Q_{KV} \Delta p_{KV}}{Q_{KN} + Q_{KV}}, \quad (2)$$

де  $Q_{KN}$  – потужність КУ споживача з конденсаторами 0,4 кВ, квар;  $Q_{KV}$  – потужність КУ споживача з конденсаторами 6(10) кВ, квар.

Застосування для потреб компенсації реактивного навантаження СЕП синхронних двигунів (навіть, якщо їх вже використовують за технологічним процесом виробництва) економічно недоцільно. Їх питомі активні втрати, як ПКРН, значно перебільшують питомі втрати в КУ [7].

Методику системного розрахунку реактивного навантаження СЕП споживачів, що пропонується, розглянемо на прикладі системи електропостачання загального призначення, принципову схему якої наведено на рис. 1,а. Її заступну схему показано на рис. 1,б.

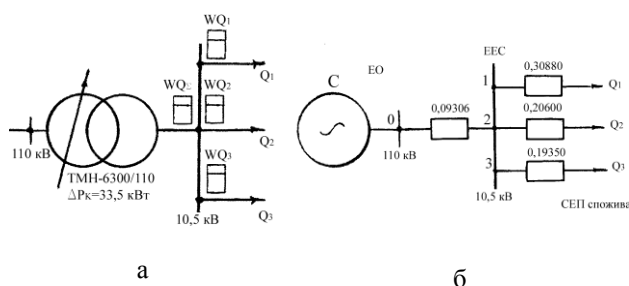


Рисунок 1 – Приклад СЕП загального призначення:  
а) – принципова схема; б) – заступна схема

Як можна бачити, такою СЕП є трансформатор ТМН-6300/110, від якого живляться споживачі з параметрами режиму власих СЕП у розрахунковому періоді відповідно до даних табл. 1, де  $WP_i$  – виток активної ЕЕ, кВт-год;  $WQ_i$  – виток реактивної ЕЕ (індуктивного та ємнісного характеру разом), квар-год.

Таблиця 1 – Параметри режиму електроспоживання

№/№	$WP_i$ , кВт-год	$WQ_i^+$ , квар-год	$WQ_i^-$ , квар-год	$WQ_i$ , квар-год
1.	504000	115290	10710	126000
2.	534190	143740	21860	165600
3.	781715	247880	25720	273600
$\Sigma$	1819905	506910	58290	565200

При цьому потужність ПКРН у СЕП кожного споживача визначено за його власними розрахунками (можливо, із застосуванням формули (2)).

З урахуванням числа годин вмикання споживачів у розрахунковому періоді та потужності їх ПКРН у табл. 2 наведено середньовиважені значення їх навантаження.

При цьому активні втрати в мережі СЕП від такого реактивного навантаження можна визначити за відомим співвідношенням, кВт

$$\Delta P_{Qi} = \frac{Q_{\Sigma i}^2}{U^2} R_{Ei} \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

де  $R_{Ei}$  – еквівалентний активний опір ЕМ СЕП, що розглядається, приведений до її номінальної напруги, Ом.

Таблиця 2 – Середньовиважені навантаження 1

№/№	$P_{Di}$ , кВт	$P_i$ , кВт	$Q_i$ , квар	$Q_{KNi}$ , квар	$Q_{KVi}$ , квар	$tg \varphi_i$ , в.о.
1.	800	700	105	450	-	0,150
2.	1000	742	230	400	230	0,310
3.	1500	1086	380	650	300	0,350
$\Sigma$	3300	2528	785	1430	530	0,310

У даному випадку еквівалентний активний опір ЕМ СЕП загального призначення складає:

$$R_{E0} = R_T = \frac{33,5 \cdot 10,5^2 \cdot 10^{-3}}{6,3^2} = 0,09306 \text{ Ом.}$$

Величину еквівалентних активних опорів ЕМ СЕП кожного споживача наведено на рис. 1,б. Вони складають:  $R_{E1} = 0,30880$  Ом;  $R_{E2} = 0,20600$  Ом;  $R_{E3} = 0,19350$  Ом.

За формулою (3) активні втрати в СЕП загального призначення від загального реактивного навантаження споживачів складають величину

$$\Delta P_{Q0} = \frac{785^2}{10,5^2} 0,09306 \cdot 10^{-3} = 0,520 \text{ кВт.}$$

Відомо, що в ринкових умовах, які діють в електроенергетиці України, споживачі повинні відшкодувати електропостачальним організаціям (ЕО) збиток (вартість активних втрат у мережах СЕП загального призначення) від їх власного реактивного навантаження.

Розподіл таких активних втрат між окремими споживачами доцільно проводити обернено пропорційно до квадрату їх реактивного навантаження [8]. При цьому за одиницю виміру приймається реактивне навантаження найменш навантаженого споживача, а розрахункові коефіцієнти визначаються наступним чином:

$$K_{\Delta} = \frac{Q_i^2}{Q_{\min}^2} \text{ од.} \quad (4)$$

Результати розрахунку із застосуванням формули (4) наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри режиму 1 СЕП

№/№	$P_i$ , кВт	$Q_i$ , квар	$K_{\Delta i}$ , в.о.	$\Delta P_{Q0i}$ , кВт
1.	700	105	1,0000	0,023
2.	742	230	4,7982	0,109
3.	1086	380	13,0975	0,299
$\Sigma$	2528	715	18,8957	0,431

Активні втрати в ПКРН споживачів визначаються за відомими співвідношеннями:

В КУ з номінальною напругою конденсаторів 0,38 кВ, кВт

$$\Delta P_{KN} = \Delta p_{KN} Q_{KN}. \quad (5)$$

В КУ з номінальною напругою конденсаторів 10,0 кВ, кВт

$$\Delta P_{KV} = \Delta p_{KV} Q_{KV}. \quad (6)$$

Загальні активні втрати, що залежать від реактивного навантаження СЕП кожного споживача, визначаються, кВт:

$$\Delta P_{Q\Sigma i} = \Delta P_{Qi} + \Delta P_{KNi} + \Delta P_{KVi} + \Delta P_{Qoi}. \quad (7)$$

Розрахунок таких втрат в СЕП загального призначення наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Активні втрати СЕП режиму 1

№/ /№	$\Delta P_{Qi}$ , кВт	$\Delta P_{KNi}$ , кВт	$\Delta P_{KVi}$ , кВт	$\Delta P_{Q\Sigma i}$ , кВт
1.	0,031	0,135	0,000	0,189
2.	0,099	0,120	0,034	0,362
3.	0,253	0,195	0,045	0,792
$\Sigma$	0,383	0,450	0,079	1,343

З табл. 2 можна бачити, що, незважаючи на однотиповий підхід до визначення величини  $Q_E$  для кожного споживача за формулами (1) та (2), ступінь компенсації реактивного навантаження за допомогою їх ПКРН різний (різні значення  $tg\phi_i$ ).

Як відомо, активні втрати ЕМ від її навантаження визначаються за формулою, кВт:

$$\Delta P = \Delta P_P + \Delta P_Q, \quad (8)$$

де  $\Delta P_P$  – активні втрати ЕМ від її активного навантаження, кВт:

$$\Delta P_P = \frac{P^2}{U_{NOO}^2} R_E \cdot 10^{-3}; \quad (9)$$

$P$  – активне середньовиважене навантаження ЕМ у

Таблиця 5 – Можливі директивні значення коефіцієнта реактивної потужності споживачів  $tg\phi_E$ , в.о.

$\pm tg\phi$ , в.о.	0,000	0,224	0,274	0,300	0,324	0,346	0,367	0,387	0,406	0,424	0,447
$\pm \cos\phi$ , в.о.	1,000	0,976	0,964	0,958	0,951	0,945	0,939	0,933	0,926	0,921	0,913
$\Delta P_Q^*$ , в.о.	0,00	0,050	0,075	0,090	0,105	0,120	0,135	0,150	0,165	0,180	0,200
$\Delta P_Q$ , %	0,00	5,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00	16,50	18,00	20,00

Припустимо, що ЕО прийняла як директивне значення  $tg\phi_E = 0,25$  в.о.

При цьому в табл. 6 наведено середньовиважені навантаження СЕП за їх робочим режимом 2.

Таблиця 6 – Середньовиважені навантаження 2

№/ /№	$P_{Di}$ , кВт	$P_i$ , кВт	$Q_i$ , квар	$Q_{KNi}$ , квар	$Q_{KVi}$ , квар	$tg\phi_i$ , в.о.
1.	800	700	175	380	-	0,250
2.	1000	742	186	445	230	0,251
3.	1500	1086	271	759	300	0,249
$\Sigma$	3300	2528	632	1584	530	0,250

розрахунковому періоді, кВт;  $U_{NOM}$  – номінальна напруга ЕМ, кВ;  $R_E$  – активний еквівалентний опір ЕМ, приведений до напруги  $U_{NOM}$ , Ом;  $\Delta P_Q$  – активні втрати ЕМ від її реактивного навантаження, кВт:

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

де  $Q$  – реактивне середньовиважене навантаження ЕМ у розрахунковому періоді, квар.

Відносно значення активних втрат ЕМ у розрахунковому періоді, в.о.:

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{\Delta P_P} = \frac{\Delta P_P}{\Delta P_P} + \frac{\Delta P_Q}{\Delta P_P} = 1 + \Delta P_Q^* = 1 + tg\phi^2, \quad (11)$$

звідки

$$\Delta P_Q^* = \Delta P^* - 1 = tg\phi^2 \text{ в.о.} \quad (12)$$

При цьому значення  $\Delta P_Q$  у відсотках від величини активних втрат від активного навантаження складає:

$$\Delta P_Q = 100tg\phi^2. \quad (13)$$

У табл. 4 наведено залежність величини відносного значення активних втрат ЕМ від величини коефіцієнта реактивної потужності –  $tg\phi$ , яке може бути прийнято рішенням ЕО як директивна величина.

Наприклад, якщо ЕО приймає нормативне значення  $tg\phi_E = 0,25$  в.о., то активні втрати в її ЕМ від величини  $\Delta P_P$ :

$$\Delta P_Q^* = tg\phi^2 \cdot 100 = 0,25^2 \cdot 100 = 6,25 \text{ \%}.$$

Можливі нормативні значення  $tg\phi_E$  наведено в табл. 5.

У табл. 7 можливі значення параметрів режиму 2 СЕП загального призначення.

Таблиця 7 – Параметри режиму 2 СЕП

№/ /№	$P_i$ , кВт	$Q_i$ , квар	$K_{\Delta i}$ , в.о.	$\Delta P_{Qoi}$ , кВт
1.	700	175	1,0000	0,074
2.	742	186	1,1297	0,084
3.	1086	271	2,3981	0,179
$\Sigma$	2528	632	4,5277	0,337

Активні втрати в СЕП окремих споживачів і СЕП загального призначення від їх реактивного навантаження у цьому режимі визначаються за допомогою формул (3), (6), (7) з використанням

співвідношення (4). Числові значення таких втрат наведено в табл. 8.

Таблиця 8 – Активні втрати СЕП режиму 2

№/ /№	$\Delta P_{Qi}$ , кВт	$\Delta P_{KNi}$ , кВт	$\Delta P_{KVi}$ , кВт	$\Delta P_{Q\Sigma i}$ , кВт
1.	0,086	0,114	0,000	0,274
2.	0,065	0,133	0,034	0,316
3.	0,129	0,228	0,045	0,581
$\Sigma$	0,280	0,475	0,079	1,171

З метою подальшого зменшення активних втрат СЕП від їх реактивного навантаження можна прийняти для них значення  $tg\varphi_E = 0,15$  в.о.

Розрахунки параметрів такого режиму 3 для усіх СЕП наведено у табл. 9–11.

Таблиця 9 – Середньовиважені навантаження режиму 3

№/ /№	$P_{Di}$ , кВт	$P_i$ , кВт	$Q_i$ , квар	$Q_{KNi}$ , квар	$Q_{KVi}$ , квар	$tg\varphi_i$ , в.о.
1.	800	700	105	450	-	0,150
2.	1000	742	111	520	230	0,150
3.	1500	1086	163	867	300	0,150
$\Sigma$	3300	2528	379	1837	530	0,150

Таблиця 10 – Параметри режиму 3 СЕП

№/ /№	$P_i$ , кВт	$Q_i$ , квар	$K_{\Delta i}$ , в.о.	$\Delta P_{Q0i}$ , кВт
1.	700	105	1,0000	0,027
2.	742	111	1,1175	0,030
3.	1086	163	2,4099	0,064
$\Sigma$	2528	379	4,5274	0,121

Таблиця 11 – Активні втрати СЕП режиму 3

№/ /№	$\Delta P_{Qi}$ , кВт	$\Delta P_{KNi}$ , кВт	$\Delta P_{KVi}$ , кВт	$\Delta P_{Q\Sigma i}$ , кВт
1.	0,031	0,135	0,000	0,193
2.	0,023	0,156	0,034	0,243
3.	0,047	0,260	0,045	0,416
$\Sigma$	0,101	0,551	0,079	0,852

Результати розподілу  $Q_{E0}$  між окремими споживачами та частина величини активних втрат в ЕМ СЕП загального призначення наведено в табл. 12.

Таблиця 12 – Ефективність застосування ПКРН

№/ /№	Активні втрати від реактивного навантаження		
	$tg\varphi_{Ei}$ , в.о.	$tg\varphi_E = 0,25$ , в.о.	$tg\varphi = 0,15$ , в.о.
1.	0,189	0,274	0,193
2.	0,374	0,316	0,243
3.	0,822	0,581	0,416
$\Sigma$	1,385	1,171	0,852

У табл. 5 наведено значення реактивного навантаження споживачів для трьох випадків:

$Q_{Ei}$  – економічне з точки зору споживача;

$Q_{E\Sigma i}$  – економічне з точки зору ЕО;

$Q_E$  – економічне з точки зору ЕЕС.

Очевидно, що перевагу необхідно віддати останньому, що підтверджують дані табл. 6.

ВИСНОВКИ. 1. Для забезпечення загальної економічності компенсації реактивного навантаження ЕЕС до її розрахунків необхідно застосовувати кібернетичний підхід: від споживачів до центру живлення, а потім у зворотному напрямку.

2. Незважаючи на те, що реактивної ЕЕ як товарної продукції ЕЕС фізично бути не може, вона як фізичне явище суттєво впливає (у першу чергу) на величину активних втрат в ЕМ системи.

3. У ринкових умовах, що діють в електроенергетиці України, споживачі повинні самостійно вирішувати питання про економічність компенсації реактивного навантаження ЕМ власних СЕП, а результати таких розрахунків доводити до відома ЕО.

4. За результатами комерційного обліку ЕЕ, який встановлено на межі балансової належності ЕМ в СЕП загального призначення, ЕО визначає величину активних втрат у власних ЕМ від реактивного навантаження споживачів і розподіляє ці втрати між споживачами обернено пропорційно до квадрату їх реактивного навантаження.

5. Критерієм для оцінки рівня активних втрат від реактивного навантаження споживачів у СЕП загального призначення може слугувати коефіцієнт реактивної потужності (зазвичай це відношення середньовиважених у розрахунковому періоді значень реактивної та активної потужності –  $tg\varphi$ ).

6. Системний розрахунок компенсації реактивного навантаження ЕЕС полягає у визначенні такого значення  $tg\varphi_E$ , за яким загальні активні втрати в СЕП загального призначення мають найменшу величину.

7. Очевидно, що величина  $tg\varphi_E$  не повинна бути меншою, ніж найменше значення  $tg\varphi$ , визначене економічними розрахунками споживачів.

#### ЛІТЕРАТУРА

- Веников В.А. Системный подход к проблемам электроэнергетических систем // Электричество. – 1985. – № 6. – С. 1–4.
- Сюсюкин А.И. К вопросу об оплате (надбавках) за реактивную электрическую энергию. Промышленная энергетика. – 2001. – № 9. – С. 53.
- ДСТУ 2843–94 Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. Держстандарт України, 1995. – 67 с.
- Дорошенко А.И. Щодо фізичної сутності реактивної електроенергії електроенергетичної системи // Промелектро. – 2006. – № 6. – С. 48–53.
- Бочаров М.К., Зубюк Ю.П. Особенности разработки и внедрения современных конденсаторных установок среднего напряжения // Наукові праці

Донецького національного технічного університету. Серія "Електротехніка і енергетика". – Вип. 11 (186). – Донецьк. – 2011. – С. 74–76.

6. Дорошенко О.І., Дорошенко С.О. Визначення потужності компенсуючих пристроїв споживачів електроенергії // *Машинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб.* – 2001. – Вип. 56. – С. 76–80.

7. Дорошенко О.І. Щодо вибору систем електро-

приводів з урахуванням компенсації реактивної потужності // *Промелектро.* – 2010. – № 5. – С. 56–57.

8. Дорошенко О.І. Щодо визначення економічного значення реактивного навантаження споживачів (системний розрахунок) // *Енергетика та електрифікація.* – 2011. – № 2. – С. 50–52.

### CONCERNING THE SYSTEM APPROACH IN ELECTRIC ENERGETIC

**O. Doroshenko, O. Ivko**

Odesa National Polytechnic University

prosp. Shevchenka, 1, Odesa, 65111, Ukraine. E-mail: dai1938@yandex.ua

It was proved that to achieving a common minimum of active loss from a reactive load of users in electric energetic system the systematic calculation has to be done using a known cybernetic approach: from users to a electric supply organization, after that – to the users. An example of such calculation is given in an article. The method of calculation system reactive load of power supply systems consumers considered the example of the power supply system for general use.

**Key words:** power system, system calculation, reactive load.

### REFERENCES

1. Venikov V.A. Systematic approach to the problems of electric power systems // *Electricity.* – 1985. – № 6. – PP. 1–4. [in Russian]

2. Syusyukin A.I. On the question of payment (premium) for reactive electrical energy // *Industrial energy.* – 2001. – № 9. – P. 53. [in Russian]

3. DSTU 2843-94 Elect. Concepts. Terms and definitions. Gosstandart of Ukraine, 1995. – 67 p. [in Ukrainian]

4. Doroshenko A.I. In the physical nature of reactive power electricity system // *Promelectro.* – 2006. – № 6. – PP. 48–53. [in Ukrainian]

5. Bocharov M.K., Zubyuk J.P. Features-time processing and the introduction of modern medium-voltage capacitor banks // *Scientific works of the Donetsk National Technical University. A series of "Electrical and Power."* – Iss. 11 (186). – Donetsk. – 2011. – PP. 74–76. [in Russian]

6. Doroshenko O.I., Doroshenko S.O. Determination of power compensating devices consumers of electricity // *Mechanical Engineering and Electrical.* – 2001. – Iss. 56. – PP. 76–80. [in Ukrainian]

7. Doroshenko O.I. Choice of electric drive systems including reactive power compensation // *Promelectro.* – 2010. – № 5. – PP. 56–57. [in Ukrainian]

8. Doroshenko O.I. For determining the economic value of reactive load consumers (system account) // *Energy and electrification.* – 2011. – № 2. – PP. 50–52. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 19.01.2012.

Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Бялобржеським О.В.