

**ЕКОНОМІЧНА КІБЕРНЕТИКА ЕНЕРГООЩАДНИХ ЗАХОДІВ В
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЕЛЕКТРОСПОЖІВАЧІВ**

А. О. Омельчук, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Заколюдажний, асистент

А. О. Тимохіна, асистент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*М. О. Лозова, студентка економічного факультету Київського
національного університету імені Тараса Шевченка.*

E-mail: omelchuk_anatoli@ukr.net, zakolodyazhny@ukr.net, a.planida@ukr.net,
marylozova111@gmail.com

Анотація. Ефективними практичними діями з енергозбереження є роботи з нормалізації потоків реактивної потужності і її компенсації. Це буде початком глобального процесу зниження втрат електроенергії в електричних мережах, що еквівалентно спорудженню додаткових генеруючих потужностей, але з меншими затратами.

У статті моделюється режим роботи регульованої конденсаторної установки (КУ) напругою 0,4 кВ з метою оцінки економічної ефективності її роботи в електричних мережах виробничих споживачів електроенергії. Проаналізовано режим активного і реактивного навантаження електричної мережі, обґрунтовано вибір оптимальної потужності регульованої КУ та досліджені показники економічної ефективності компенсації реактивної потужності на розглянутому прикладі електричної мережі.

Згідно чинних нормативних документів, реактивні перетікання певної величини з мереж постачальних організацій в мережі споживачів потребують їх оплати або застосування засобів компенсації цих перетоків. Окрім цього, реактивні перетікання обмежують пропускну здатність електричних мереж живлення.

З метою підвищення економічності електроспоживання та пропускну здатності електричних мереж живлення пропонується алгоритм вибору параметрів КУ та оцінки економічної ефективності її роботи.

Ключові слова: *втрати електроенергії, компенсація реактивної потужності, відхилення напруги, конденсаторні батареї, пропускну здатність*

Актуальність. Важливим інструментом державної політики повинна стати підтримка бізнесу в сфері енергозбереження такого необхідного державі, що дозволить сформувати енергозберігаючі компанії, що реалізують науково-технічні

енергозберігаючі рішення. Важливим для успішного енергозберігаючого бізнесу є перехід від прямої фінансової допомоги з боку держави до формування системи реалізації ефективних бізнес-проектів у цій сфері. Прикладом ефективних практичних дій з енергозбереження є роботи з нормалізації потоків реактивної потужності і її компенсації. Тим самим буде покладено початок глобальному процесу зниження втрат електроенергії в електричних мережах, що еквівалентно спорудженню додаткових генеруючих потужностей, але з меншими затратами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання компенсації реактивної потужності розглядається авторами багатьох публікацій [3, 4, 5], але сучасні умови роботи електричних мереж та чинні нормативно-технічні вимоги створюють нові умови і вимагають нових підходів до найефективнішого енергозберігаючого заходу в електричних мережах.

Генерація реактивної потужності можлива, окрім генераторів електростанцій, так і КУ, що встановлюються як у вузлах мережі, так і безпосередньо в електроустановках споживачів електроенергії. Це зменшує потоки реактивної потужності в електричних мережах живлення, що дозволить зменшити втрати потужності, електроенергії і напруги в цих мережах.

Завдання обґрунтування параметрів і розміщення КУ в електричних мережах розділяється на дві складові: підтримка балансу реактивної потужності в електричній системі (ЕС) і зниження втрат потужності і електроенергії в розподільних мережах та мережах споживачів.

Недостатня компенсація реактивної потужності – це збільшення втрат потужності в електричних мережах і зменшенню їх пропускної спроможності.

Однією з причин загострення такої ситуації є зміни в характері навантаження електроспоживання: це технологічне устаткування на напівпровідниковій базі, збільшення частки освітлювального навантаження з одночасним зменшенням частки ламп розжарювання, збільшення частки нелінійного навантаження, в тому числі, побутового привели до значного завантаження розподільних електричних мереж реактивною потужністю. А це, в свою чергу, не дозволяє пропускати по них активну потужність, на яку ці лінії були розраховані.

Аналіз системних аварій у світовій енергетиці показує їх зв'язок з розвитком лавини напруги – прогресуючим зниженням напруги в усій мережі, викликаним дефіцитом реактивної потужності. Тому забезпечення запасів реактивної потужності потрібне не лише для підвищення економічності функціонування мереж, але і для забезпечення надійності електричних систем.

Негативний результат від згаданих недоліків проявляється і в такому:

- зростає число відключень споживачів і розміри навантажень, відключених захистами при зниженні напруги під час коротких замикань в електричних мережах, що пов'язане з відсутністю запасу по напрузі на шинах приєднання;
- зростає імовірність аварійного відключення споживачів через перевантаження ліній електропередачі і трансформаторів підстанцій, в тому числі і необґрунтованими потоками реактивної потужності;
- дефіцит активної потужності у ряді вузлів через істотне зростання втрат активної потужності в електричних мережах і граничне завантаження ліній електропередачі надмірними потоками реактивної потужності не тільки погіршили економічність роботи електромереж, але і привели до заборони приєднання нових споживачів або збільшення потужності приєднаних.

Метою дослідження є:

- обґрунтування параметрів та місця встановлення регульованих КУ;
- визначення впливу компенсації реактивної потужності на оплату за реактивні перетікання з мереж електропостачальних організацій;
- визначення впливу компенсації реактивної потужності на пропускну спроможність електричних мереж;

Матеріали і методи дослідження.

У проведеному дослідженні вибір місця встановлення і потужності регульованої КУ обумовлений значною потужністю, в першу чергу, реактивного навантаження даної трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ закритого типу (ЗТП) і, відповідно, технічною можливістю розміщення КУ в приміщенні цієї ЗТП – цього достатньо для досягнення мети дослідження. Для схеми мережі, де від електричної системи по лінії 10 кВ живиться ЗТП 10/0,4 кВ (рис.1), змодельємо режими роботи

КУ, підключеної до шин 0,4 кВ цієї ЗТП та їх оцінку.

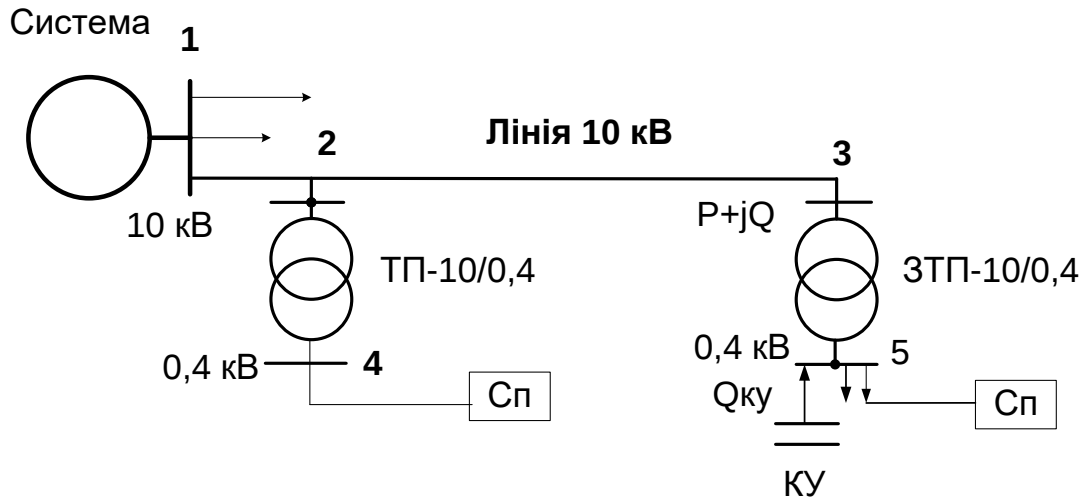


Рис.1. Пояснювальна схема електричної мережі до моделювання роботи КУ.

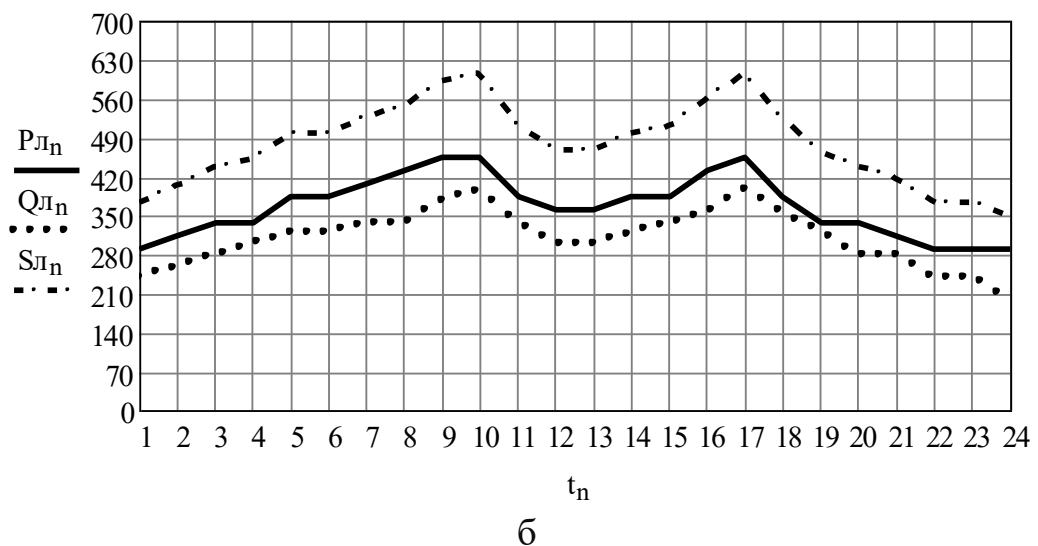
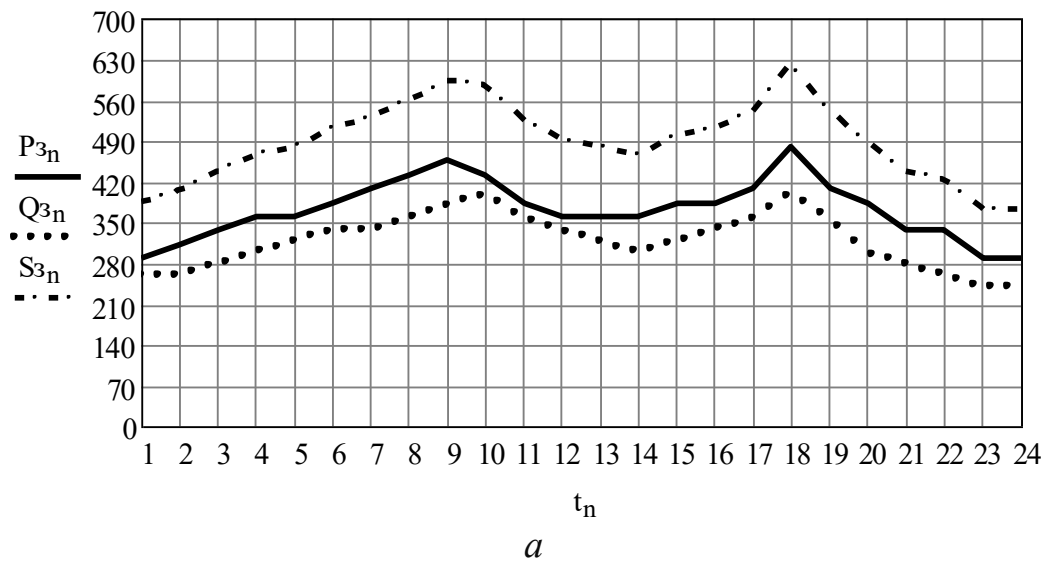


Рис.2. Добові графіки активного P , реактивного Q та повного S навантаження ЗТП 10/0,4 кВ зимового (а) та літнього (б) періоду

На ЗТП встановлено силовий трансформатор типу ТМ-400 з активним опором обмоток $R_T=3,438$ Ом, розрахунковий період – місяць -744 години, опір системи $r_c=2,1$ Ом, опір лінії 10 кВ, довжиною 1650 м, виконаної кабелем ААШВ 3х120 $R_L=0,502$ Ом. Вартість 1 кВт·год електроенергії в мережі $c=4,3$ грн/кВт·год.

Щомісячне споживання споживачем активної і реактивної енергії складає $WP_{mic}=2,657 \cdot 10^5$ кВт·год, $WQ_{mic}=2,255 \cdot 10^5$ кВАр·год. Очікувані щомісячні втрати електроенергії в розглядуваній мережі $\Delta W_{mic}=1,039 \cdot 10^4$ кВт·год.

Фактичні величини розрахункового активного P , реактивного Q і повного S навантаження на шинах 0.4 кВ підстанцій 10/0,4 кВ: $P_p=480$ кВт, $Q=397,7$ кВАр, $S=623,4$ кВА, $\cos \varphi=0,77$.

Оплата за споживання і генерацію реактивної електроенергії в точці обліку визначається трьома складовими [1]:

$$П = П1 + П2 - П3, \quad (1)$$

де $П1$ – основна оплата за перетікання реактивної електроенергії, грн:

$$П1 = (WQ_{mic} + WQ_r) \cdot D \cdot Ц, \quad (2)$$

де D - економічний еквівалент реактивної потужності [1], кВт/кВ·Ар;

$Ц$ - прогнозована ціна закупівлі електроенергії на ринках, що визначається на рівні прогнозованої оптової ринкової ціни на електроенергію, яка затверджена НКРЕКП на квартал, що передував даті початку дії нового ринку електроенергії, грн/кВт·год;

$П2$ – надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами компенсації реактивної потужності (КРП), грн:

$$П2 = П1 \cdot (\operatorname{tg} \varphi - 0,25)^2, \quad (3)$$

Фактичний тангенс навантаження об'єкта споживача визначається за формулою $\operatorname{tg} \varphi = WQ_{mic} / WP_{mic}$.

$П3$ – знижка плати при залученні споживача до регулювання балансу реактивної потужності (електроенергії), грн. Оскільки наш споживач не приймає участі в генерації реактивної потужності $WQ_r=0$, то цю складову в дослідженні не враховуємо.

Оплата за реактивні перетікання з мережі постачальної організації складають:

$P_1=38789,36$ грн, $P_2=13910,17$ грн, $P=52699,53$ грн.

Досліджується робота КУ типу УКРМ 0.4-400-11-10-31УЗ, потужністю 400 кВ·Ар (10 ступенів по 40 кВ·Ар) вартістю $K=130\,000$ грн.

Режим включення КУ в залежності від реактивного навантаження на шинах 0,4 кВ ЗТП моделюється функцією (для зимового графіку навантаження):

$$N_{3n} := \text{if} \left(\frac{Q_{3n}}{P_{3n}} < Z, \text{floor} \left(\frac{Q_{3n}}{q_1} \right), \text{ceil} \left(\frac{Q_{3n}}{q_1} \right) \right) \quad (4)$$

де P_3 , Q_3 – погодинні активне (кВт) та реактивне (кВ·Ар) навантаження добового графіку;

q_1 – потужність однієї ступені регульованої КУ, кВ·Ар;

Z - кількість ступенів регулювання КУ.

Результати досліджень та їх обговорення. Змодельовавши режим роботи КУ, отримали графіки реактивних навантажень і ввімкненої потужності КУ (рис.3) та графіки споживання реактивної потужності з мережі живлення до її компенсації і після її компенсації (рис.4).

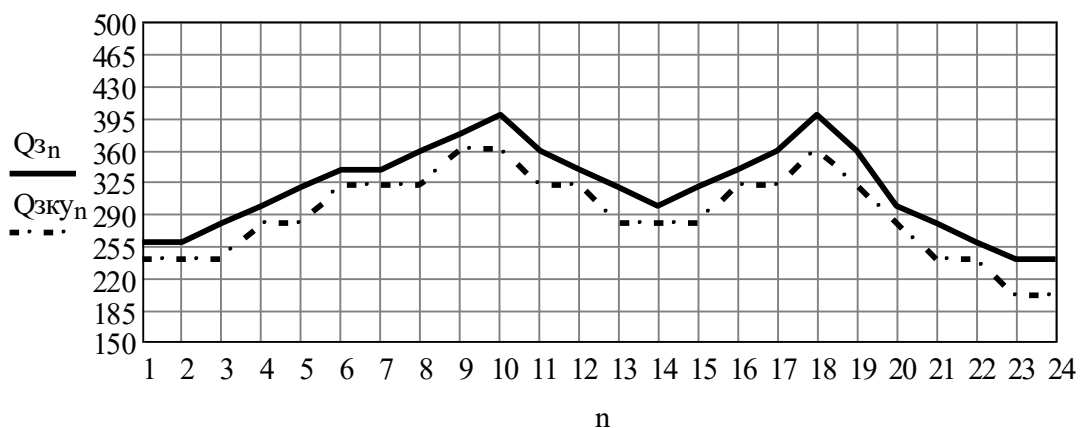


Рис.3. Графіки реактивних навантажень Q_3 (суцільна лінія) і ввімкненої потужності КУ $Q_{3ку}$ (штрих-пунктирна лінія) для зимового періоду

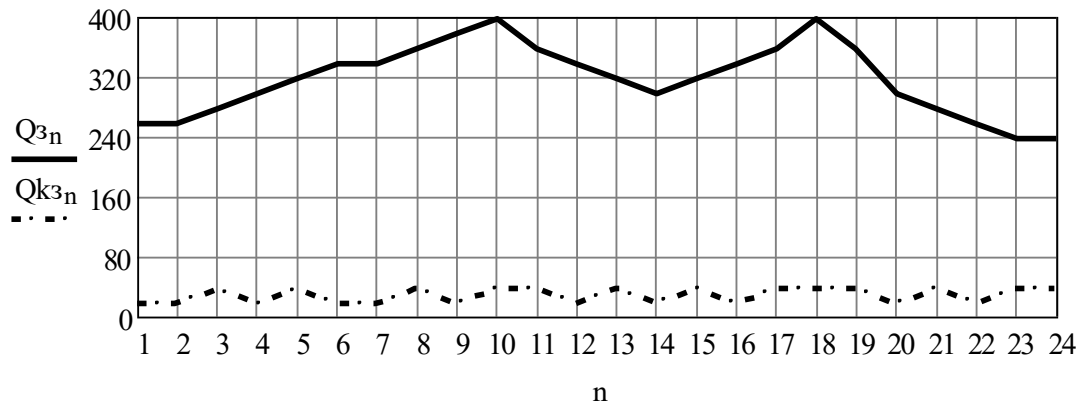


Рис.4. Графіки споживання реактивної потужності з мережі живлення до її компенсації (суцільна лінія) і після її компенсації (штрих-пунктирна лінія) для зимового періоду

Розрахунок оплати за реактивні перетікання після їх компенсації показав таке: $P_{1k}=7647$ грн, $P_{2k}=7,87$ грн, $P_k=7655$ грн.

Отже, зниження щомісячної плати за реактивні перетікання при їх компенсації складає:

$$\square P_{mic} = P - P_k = 52699,53 - 7655 = 45040 \text{ грн.}$$

Окрім зниження оплати, компенсація реактивної потужності розвантажує електричну мережу і силовий трансформатор ЗТП 10/0,4 кВ приблизно на 30 %, що є важливим для перевантаженої підстанції (рис.5):

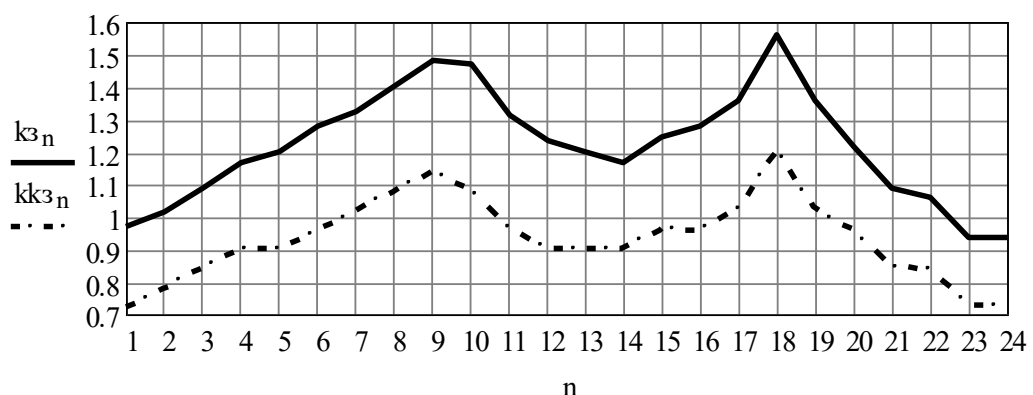


Рис.5. Коефіцієнти завантаження електричної мережі і трансформатора ЗТП протягом доби до (суцільна лінія) і після (штрих-пунктирна лінія) компенсації (для зимового графіка)

Економічну ефективність компенсації реактивної потужності на шинах 0,4 кВ ЗТП наочно ілюструє чистий дисконтований дохід кожного m місяця (рис.6) [2]:

$$\text{ЧДД}_m := \sum_{m=1}^m \left[(\Delta \text{Пміс}_m - \text{З}_m - \text{К}_m) \cdot \frac{1}{(1+e)^m} \right] \quad (5)$$

де З_m – амортизаційні, експлуатаційні та кредитні щомісячні відрахування від вартості КУ:

$$\text{З}_m = \text{К} \cdot \text{Е}, \quad (6)$$

Е – загальний коефіцієнт відрахувань на амортизацію Е_a , експлуатацію Е_e та відшкодування кредитних коштів, в.о.

$$\text{Е} = \text{Е}_a + \text{Е}_e + e, \quad (7)$$

e – номінальна норма дисконту, прирівняна до вартості кредиту за курсом НБУ, в.о.

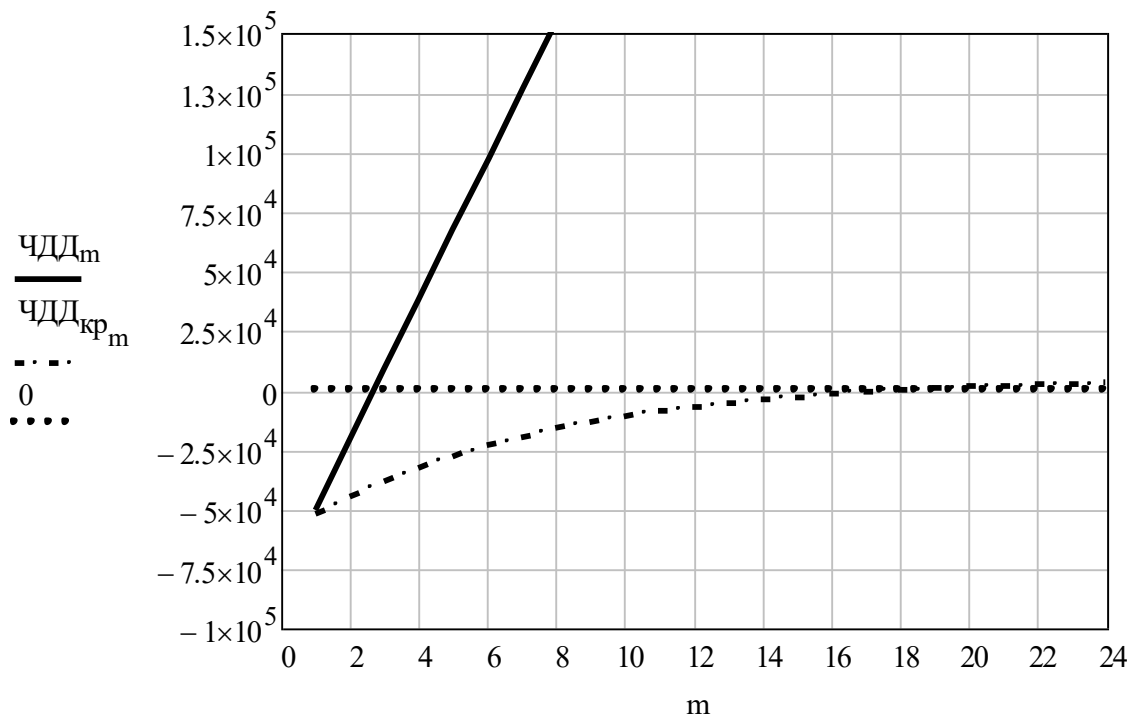


Рис.6. Зміна чистого дисконтованого доходу від компенсації реактивної потужності протягом двох років експлуатації:

ЧДД (суцільна лінія) - при придбанні КУ за власні кошти споживача; ЧДД_{кр} (штрих-пунктирна лінія) - при придбанні КУ за запозичені кошти

Висновки і перспективи.

Найбільш прикладним і відчутним економічним ефектом компенсації реактивної потужності є зниження щомісячної плати за реактивні перетікання з електричної мережі електропостачальної організації. Окрім цього, компенсація реактивної потужності розвантажує електричну мережу і силовий трансформатор

ЗТП 10/0,4 кВ у цьому дослідженні приблизно на 30 %, що підвищує пропускну здатність електричної мережі, особливо в умовах перевантаження її елементів – кабелів, силових трансформаторів.

Як показали результати дослідження, сумарний дисконтований дохід за 2 роки експлуатації досліджуваної КУ складає $\text{ЧДД} = 6,268 \cdot 10^5$ грн при придбанні КУ за власні кошти споживача, і $\text{ЧДД}_{\text{кр}} = 3135$ грн - при придбанні КУ за запозичені кошти (з урахуванням е).

Чистий дисконтований дохід стає додатним на 3-му місяці з початку експлуатації конденсаторної установки - за умови придбання КУ за кошти споживача і на 19-му місяці - за умови придбання КУ за запозичені кошти за курсом НБУ.

Зменшення в розподільних мережах баластних потоків реактивної потужності за рахунок її компенсації у споживача або на підстанціях електропостачальних компаній дозволить:

- забезпечити підключення додаткових або збільшити встановлену потужність вже підключених споживачів (за наявності у вузлах тієї ж активної потужності і тієї ж пропускну здатності мереж). А це призведе до приросту споживання активної потужності без збільшення її вироблення у вузлі або перетікання з інших мереж;
- самому споживачеві збільшити свої виробничі потужності з компенсацією реактивної потужності без збільшення споживання її з мережі;
- поліпшити техніко-економічну ефективність як систем електропостачання, так і самих споживачів;
- підвищити стійкість електричних систем, систем електропостачання і навантаження споживачів при зниженні і провалах напруги в мережі.

Перелічене вище є вигідним електропостачальним компаніям за рахунок підвищення ефективності їх роботи і споживачам електроенергії за рахунок скорочення енергоемності і вартості продукції.

Список використаних джерел

1. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії / Наказ Міненерго та вугільної промисловості № 87 від 06.02.2018. Офіційний вісник

України від 27.04.2018. - № 33. - с. 172.

2. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі: ГКД 340.000.002-97. К.: Міненерго України, 1997. 54 с.

3. Омельчук А.О. Енергозберігаючі режими в системах електропостачання. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. 257 с.

4. Лежнюк П. Д., Нанака О.М. Формування умов оптимальності компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній : монографія Вінниця : ВНТУ, 2015. 148 с.

5. Рогальський Б. С., Добровольська Л. Н., Нанака О. М. Обґрунтування переходу плати за споживання реактивної електроенергії на плату за реактивну потужністю Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2008. № 3. С. 42–45.

References

1. Metodyka obchyslennya platy za peretikannya reaktivnoyi elektroenerhiyi [Methodology for calculating the fee for the flow of reactive electricity] / Nakaz Minenerho ta vuhil'noyi promyslovosti № 87 vid 06.02.2018. Ofitsiynyy visnyk Ukrayiny 27.04.2018, 33, 172.

2. Vyznachennya ekonomichnoyi efektyvnosti kapital'nykh vkladov v enerhetyku. Metodyka. Enerhosystemy i elektrychni merezhi [Determination of the economic efficiency of capital investments in energy. Method. Energy systems and electrical networks]: HKD 340.000.002-97. Kyiv: Minenerho Ukrayiny, 1997, 54.

3. Omel'chuk, A.O. (2016) Enerhozberihayuchi rezhymy v systemakh elektropostachannya [Energy-saving modes in power supply systems]. Kyiv: CP "COMPRINT", 257.

4. Lezhnyuk, P. D., Nanaka, O. M. (2015). Formuvannya umov optymal'nosti kompensatsiyi reaktivnoyi potuzhnosti v elektrychnykh merezhakh spozhyvachiv i enerhopostachal'nykh kompaniy: monohrafiya [Formation of optimal conditions for compensation of reactive power in electric networks of consumers and energy supply companies]. Vinnytsya: VNTU, 148.

5. Rohal's'kyi, B. S., Dobrovol's'ka, L. N., Nanaka, O. M. (2008). Obgruntuvannya perekhodu platy za spozhyvannya reaktivnoyi elektroenerhiyi na platu za reaktivnu potuzhnist' [Justification of the transition of the charge for the consumption of reactive electricity to the charge for reactive power]. Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. 3, 42–45.

ECONOMIC CYBERNETICS OF ENERGY SAVING MEASURES IN THE ELECTRICAL NETWORKS OF ELECTRICITY CONSUMERS

A. Omelchuk, V. Zakolodyazhnyi, A. Timokhina, M. Lozova

Abstract. *Effective practical actions for energy saving are work on the normalization of reactive power flows and its compensation. This will be the beginning of a global process of reducing electricity losses in electrical networks, which is equivalent to the construction of additional generating capacities, but with lower costs.*

The article simulates the mode of operation of a regulated capacitor unit (CU) with a

voltage of 0.4 kV in order to assess the economic efficiency of its operation in electrical networks of industrial electricity consumers. The mode of active and reactive load of the electric network was analyzed, the choice of the optimal power of the regulated CU was substantiated, and indicators of the economic efficiency of reactive power compensation were investigated on the considered example of the electric network.

According to current regulatory documents, reactive flows of a certain amount from the networks of supply organizations to the network of consumers require their payment or the use of means of compensation for these flows. In addition, reactive flows limit the bandwidth of electrical power networks.

In order to increase the efficiency of electricity consumption and the throughput of electrical power networks, an algorithm for selecting the parameters of the CU and evaluating the economic efficiency of its operation is proposed.

Key words: *power losses, reactive power compensation, voltage deviation, capacitor banks, bandwidth*