

ЕКОНОМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГООЩАДНИХ ЗАХОДІВ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Моделюється режим роботи регульованої конденсаторної установки (КУ) напругою 0,4 кВ з метою дослідження економічної ефективності її роботи в електричній мережі живлення споживачів електроенергії. Проаналізовані добові графіки активного і реактивного навантаження трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ і живлячої мережі, досліджено режими роботи КУ та визначені 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 роботи КУ та оцінки економічної ефективності її роботи.

Ключові слова: реактивні перетікання, втрати електроенергії, компенсація реактивної потужності, дисконтований дохід, конденсаторні батареї, пропускну здатність.

Актуальність.

Прикладом ефективних практичних дій з енергозбереження є роботи по нормалізації потоків реактивної потужності і її компенсації – це сприятиме зниженню втрат електроенергії в електричних мережах, що еквівалентно спорудженню додаткових генеруючих потужностей, але з меншими затратами.

Питання компенсації реактивної потужності розглядається авторами багатьох публікацій [3, 4, 5], але сучасні умови роботи електричних мереж та чинні нормативно-технічні вимоги вимагають нових підходів до найефективнішого енергозберігаючого заходу в електричних 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 пропускну спроможності.

Однією з причин загострення такої ситуації є зміни в характері навантаження електроспоживання: це технологічне устаткування на напівпровідниковій базі, збільшення долі освітлювального навантаження з одночасним зменшенням долі ламп розжарювання, збільшення долі 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 по 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.

Окрім цього, зростає імовірність аварійного відключення споживачів через перевантаження ліній електропередачі і трансформаторів підстанцій, в тому числі і необґрунтованими потоками реактивної потужності.

Метою дослідження є:

- обґрунтування алгоритму роботи 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.

В 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.

На ЗТП встановлено силовий трансформатор типу ТМ-630 з активним опором обмоток $R_t=1,915$ Ом, розрахунковий період – місяць -740 години, опір системи $r_c=2,2$ Ом, опір лінії 10 кВ, довжиною 1800 м, виконаної кабелем ААШВ 3×120 $R_{л}=0,547$ Ом. Вартість 1 кВт·год електроенергії в мережі $\Pi=4,3$ грн/кВт·год. Сумарний опір розподільної мережі, приведений до базової напруги 10 кВ складає 4,662 Ом.

Щомісячне споживання споживачем активної і реактивної енергії складає $W_{P_{mic}}=3,155 \cdot 10^5$ кВт·год, $W_{Q_{mic}}=2,593 \cdot 10^5$ кВАр·год. Очікувані щомісячні втрати електроенергії в розглядуваній мережі $\Delta W_{mic}=1,101 \cdot 10^4$ кВт·год.

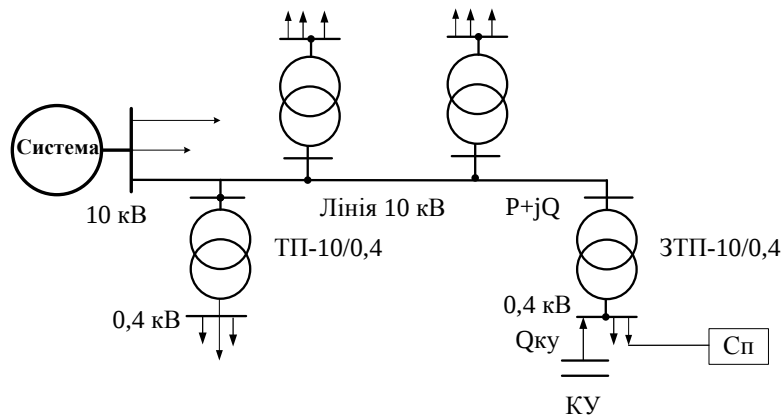


Рисунок 1 - Пояснювальна схема електричної мережі до моделювання роботи КУ.

Фактичні величини розрахункового активного P , реактивного Q і повного S навантаження на шинах 0,4 кВ підстанцій 10/0,4 кВ: $P_p=570$ кВт, $Q=457,3$ кВАр, $S=730,7$ кВА, $\cos\varphi=0,78$.

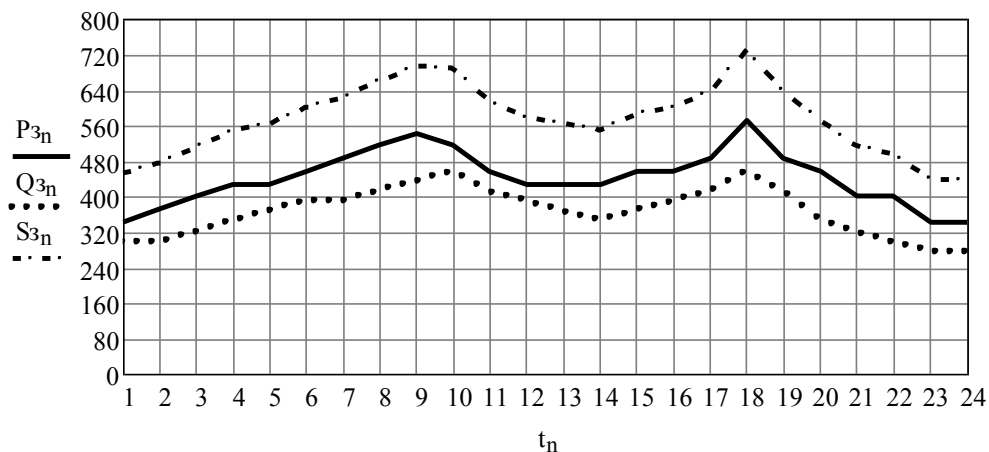


Рисунок 2 - Добові графіки активного P , реактивного Q та повного S навантаження ЗТП 10/0,4 кВ (як приклад – для зимового періоду).

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

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3, \quad (1)$$

де Π_1 – основна оплата за перетікання реактивної електроенергії, грн:

$$\Pi_1 = (W_{Q_{mic}} + W_{Q_r}) \cdot D \cdot \Pi, \quad (2)$$

де D – економічний еквівалент реактивної потужності [1], в наведеному прикладі прийнято 0,04 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 $\operatorname{tg} \varphi = WQ_{\text{mic}} / WP_{\text{mic}}$.

ПЗ – 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: $П1 = 44\,600$ грн, $П2 = 25503,2$ грн, $П = 70100,97$ грн.

Досліджується робота КУ типу УКРМ 0.4-450-10-451У3, потужністю 450 кВ·Ар (10 ступенів по 45 кВ·Ар) вартістю $K = 150\,000$ грн.

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

$$N_{3n} := \text{if} \left(\frac{Q_{3n}}{P_{3n}} < Z, \text{floor} \left(\frac{Q_{3n}}{q1} \right), \text{ceil} \left(\frac{Q_{3n}}{q1} \right) \right) \quad (4)$$

де N – кількість увімкнених ступенів конденсаторної установки в певну годину доби, шт;

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

$q1$ – потужність однієї ступені регульованої КУ, кВ·Ар;

Z – кількість ступенів регулювання КУ.

Результати досліджень та їх обговорення.

Змодельовавши режим роботи регульованої конденсаторної установки, отримали графіки реактивних навантажень і ввімкненої потужності КУ (рис.3) та графіки реактивних перетікань з мережі живлення до її компенсації і після її компенсації (рис.4).

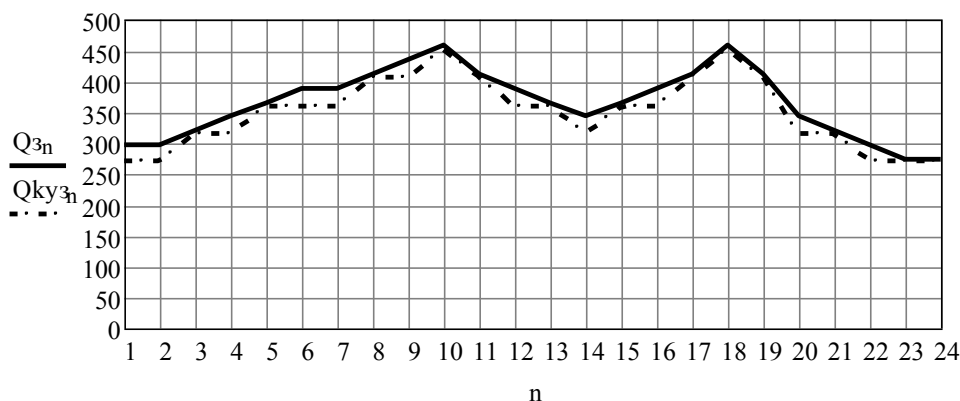


Рисунок 3 - Графіки реактивних навантажень Q_3 (суцільна лінія) і ввімкненої потужності КУ $Q_{ку}$ (штрих-пунктирна лінія) для зимового періоду.

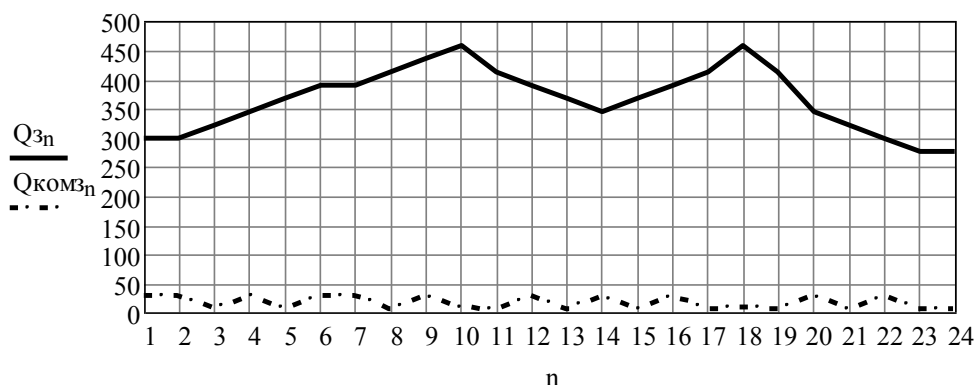


Рисунок 4 - Графіки споживання реактивної потужності з мережі живлення до її компенсації (суцільна лінія) і після її компенсації (штрих-пунктирна лінія) для зимового періоду.

Сумарна середньомісячна величина заощадженої електроенергії за рахунок зниження втрат при компенсації реактивної потужності складає $\delta W_{\text{міс}}=4443$ кВт·год. Вартість заощадженої за місяць електроенергії складає $C_w=19\,110$ грн.

Розрахунок оплати за реактивні перетікання після їх компенсації показав наступні результати: $\Pi_1=1873$ грн, $\Pi_2=0$, $\Pi_3=1873$ грн.

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

$$\Delta\P=\Pi-\Pi_k=70100,97-1873=68230\text{ грн.}$$

Економічну ефективність компенсації реактивної потужності на шинах 0,4 кВ ЗТП-10/0,4 наглядно ілюструє щомісячний m чистий дисконтований дохід (рис.5) [2]:

$$ЧДД_m := \sum_{m=1}^m \left[\left(C_{\Sigma m} + \Delta\P_m - 3_m - K_m \right) \cdot \frac{1}{(1+e)^m} \right] \quad (5)$$

де C – очікувана вартість щомісячної заощадженої електроенергії внаслідок зменшення її втрат в розподільчій мережі з трансформаторною підстанцією ЗТП-10/0,4 кВ включно, грн;

3_m – амортизаційні, експлуатаційні та кредитні щомісячні відрахування від вартості КУ:

$$3_m = K \cdot E, \quad (6)$$

E – загальний коефіцієнт відрахувань, котрий включає відрахування на амортизацію E_a , експлуатацію E_e та відшкодування кредитних коштів e , в.о.

$$E = E_a + E_e + e, \quad (7)$$

$e=0,15$ – номінальна норма дисконту, прирівняна до вартості кредиту згідно курсу НБУ, в.о;

В дослідженнях прийняті наступні значення цих коефіцієнтів $E_a=0,05$; $E_e=0,07$.

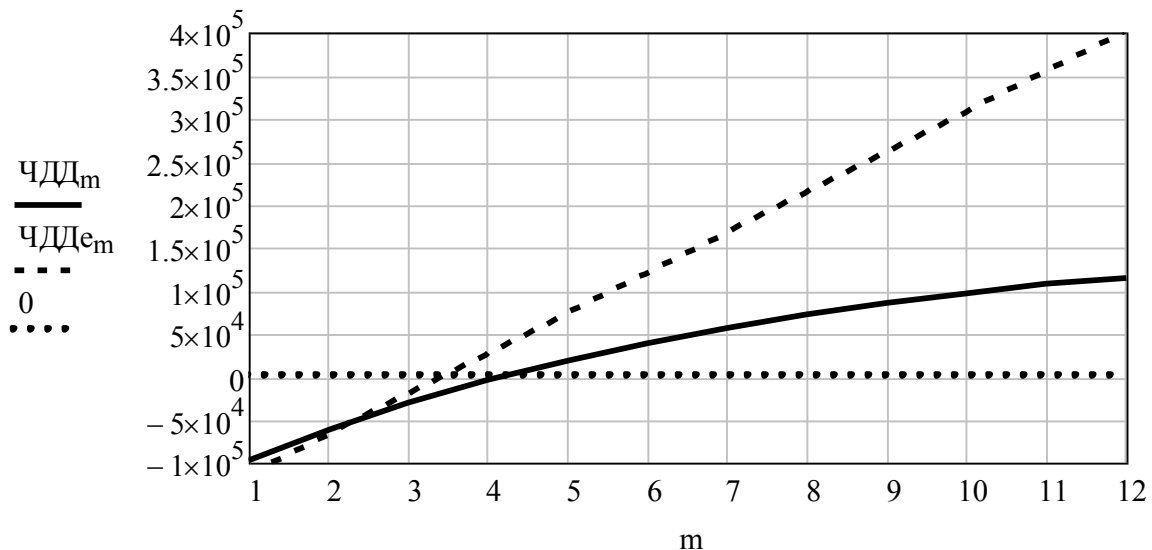


Рисунок 5 - Зміна чистого дисконтованого доходу від компенсації реактивної потужності протягом двох років експлуатації: ЧДД (суцільна лінія) - при придбанні КУ за власні кошти споживача; ЧДДкр (штрих-пунктирна лінія) - при придбанні КУ за запозичені кошти.

Висновки і перспективи.

Окрім зменшення втрати електроенергії в розподільчій мережі та плати споживачем за реактивні перетікання з мережі електропостачальної організації, компенсація реактивної потужності розвантажує електричну мережу живлення ЗТП, зокрема і саму підстанцію (рис.6): як приклад, для зимового періоду зниження повного навантаження підстанції протягом доби складає 20...26% розрахункового навантаження. В цілому це підвищує пропускну здатність електричної мережі, особливо в умовах перевантаження її елементів – кабелів, силових трансформаторів.

При цьому, коефіцієнт потужності добового навантаження зростає від 0,78 до 0,998-1,0.

Отримані результати дослідження показали, що сумарний дисконтований дохід за 1 рік експлуатації досліджуваної КУ складає ЧДДе=115200 грн - при придбанні КУ за запозичені кошти (з урахуванням $e=0,15$) і ЧДДс=402700 грн - при придбанні КУ за власні кошти споживача.

Як видно із графіків на рис.6, чистий дисконтований дохід стає додатнім через 3 місяці експлуатації регульованої конденсаторної установки, якщо вона придбана за запозичені кошти ($e=0,15$). Якщо конденсаторна установка придбана за обігові кошти підприємства ($e=0$), то чистий дисконтований дохід стає додатнім через 5 місяців роботи цієї установки.

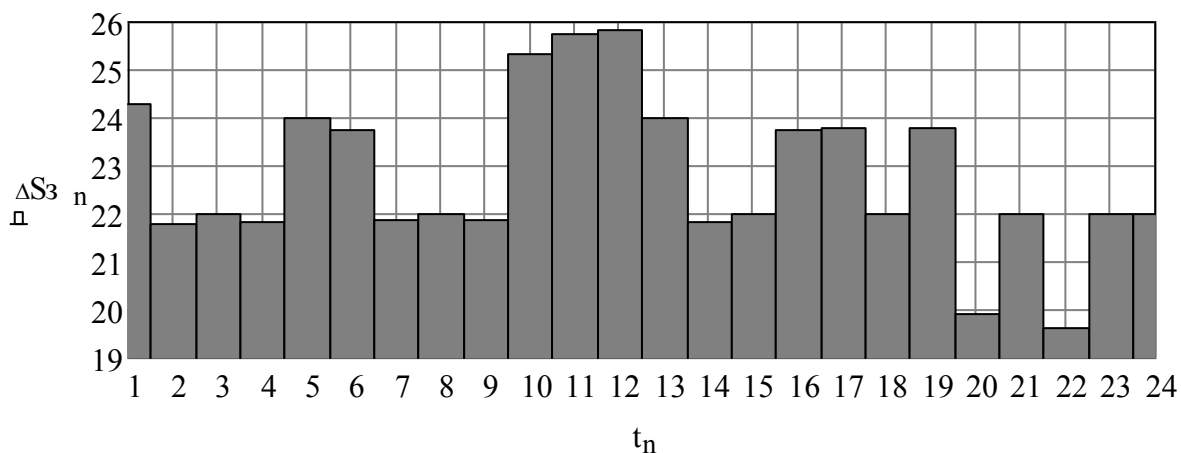


Рисунок 6 - Зниження (%) повного навантаження підстанції внаслідок КРП (як приклад - для зимового періоду).

Чистий дисконтований дохід стає додатнім на 3-му місяці з початку експлуатації конденсаторної установки - при умові придбання КУ за кошти споживача і на 19-му місяці - при умові придбання КУ за запозичені кошти згідно курсу НБУ.

Таким чином, для тимчасового збільшення пропускної здатності підстанції 10/0,4 кВ без її реконструкції доцільно застосувати компенсацію реактивної потужності за допомогою регульованої КУ потужністю 450 кВ·Ар вартістю 150000 грн.

Список використаної літератури

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: Навч. посібник / А.О.Омельчук. - К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. - 257 с.
4. Лежнюк, П. Д. Формування умов оптимальності компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній : монографія / П. Д. Лежнюк, О. М. Нанака. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 148 с.
5. Рогальський Б. С. Обґрунтування переходу плати за споживання реактивної електроенергії на плату за реактивну потужність / Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 3. – С. 42–45.

A. Omelchuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0009-0007-3964-497X

V. Zakolodyazhnyi¹, assistant, ORCID 0000-0001-8277-4170

M. Lozova², student

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Taras Shevchenko National University of Kyiv

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

The mode of operation of a regulated capacitor unit (CU) with a voltage of 0.4 kV is simulated in order to study the economic efficiency of its operation in the electric power supply network of electricity consumers. The daily schedules of active and reactive load of the 10/0.4 kV transformer substation and the supply network were analyzed, the operation modes of the CU were investigated, and the indicators of the economic efficiency of reactive power compensation were determined 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 the operation of the CU and an assessment of the economic efficiency of its operation is proposed.

Keywords: reactive flows, power losses, reactive power compensation, discounted income, capacitor banks, bandwidth.

References

1. Metodyka obchyslennya platy za peretikannya reaktyvnoyi elektroenerhiyi [Methodology for calculating the fee for the flow of reactive electricity] / Nakaz Minenerho ta vuhil'noyi promyslovosti № 87 vid 06.02.2018//Ofitsiynny 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. -K.: Minenerho Ukrayiny, 1997, 54.
3. Omel'chuk, A.O. (2016) Enerhozberihayuchi rezhymy v systemakh elektropostachannya: Navch. posibnyk [Energy-saving modes in power supply systems: Study. Manual] / A.O. Omelchuk. - K.: CP "COMPRINT", 257.
4. Lezhnyuk, P. D. (2015) Formuvannya umov optimal'nosti kompensatsiyi reaktyvnoyi 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]/ P. D. Lezhnyuk, O. M. Nanaka. – Vinnytsya : VNTU, 148.
5. Rohal's'kyi B. S. (2008) Obgruntuvannya perekhodu platy za spozhyvannya reaktyvnoyi elektroenerhiyi na platu za reaktyvnu potuzhnist' [Justification of the transition of the charge for the consumption of reactive electricity to the charge for reactive power]/ B. S. Rohal's'kyi, L. N. Dobrovol's'ka, O. M. Nanaka // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. 3, 42–45.

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025