

СКЛАДОВІ ПОТУЖНОСТІ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ З АКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Є.І. Федів*, канд. техн. наук, О.М. Сівакова**, канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка»,

вул. Ст. Бандери, 12, Львів, 79012, Україна

e-mail: yevhen.i.fediv@lpnu.ua

Проведено дослідження балансу потужності напівпровідникового регулятора напруги на активному навантаженні фазовим керуванням двоопераційними тиристорами. Підтверджено придатність його використання для одночасного отримання ресурсу реактивної потужності для розподільних електричних мереж. Відповідно до концепції інтелектуальних електричних мереж такі пристрої відносять до класу гнучких систем пересилання змінного струму, вони також можуть бути основою для побудови віртуальних джерел енергії. Досліджено складові потужності для окремих компонент регулятора, включно з тиристорним блоком. Застосовано спектральний метод опису струмів і напруг на ділянках регулятора. Отримані результати теоретичних досліджень підтверджено прикладом із чисельними розрахунками, які дали змогу уточнити фізичну суть енергетичних перетворень під час регулювання напруги. Бібл. 8, рис. 3.

Ключові слова: регулятор напруги, двоопераційний тиристор, електрична потужність, гармонічний аналіз.

Постановка проблеми. З метою збільшення ефективності функціонування систем передачі і розподілу електроенергії застосовують заходи щодо підвищення ступеня використання потужності, що надходить в електромережу шляхом зменшення різниці між потужністю генерації від джерел електроенергії та потужністю споживання у вузлах навантаження. Наприклад, динамічна компенсація реактивної потужності, тобто забезпечення балансів реактивної потужності у вузлах електричних мереж, дає змогу зменшити технологічні втрати електроенергії на етапах пересилання та розподілу, підвищити запас стійкості роботи вузлів навантаження, покращити показники якості напруги тощо [1]. Наявність нелінійного навантаження породжує спотворення форм струмів і напруг в електричних мережах, що знижує ступінь використання ліній через появу потужності спотворення [2].

У технології інтелектуальних мереж застосовують статичні джерела реактивної потужності, регульовані засобами силової електроніки – керованими напівпровідниковими вентилями (електронними ключами) [3]. На основі тиристорного регулятора змінної напруги (РЗН) з активним навантаженням, обладнаного двоопераційними тиристорами, можна отримати ресурс реактивної потужності необхідного знаку та кваліфікувати його, як віртуальне джерело реактивної потужності [4, 5]. Фазовим регулюванням повністю керованими тиристорами РЗН досягається зсув основної гармоніки струму відносно напруги живлення. Проте відкритими залишаються питання природи отриманої реактивної потужності, особливо з урахуванням гармонічного спотворення струму живлення, енергетичної участі вентиляльної частини, зведення балансів складових потужності тощо. Актуальним є співставлення отриманого енергетичного ефекту з сучасними теоріями реактивної потужності для нелінійних електричних кіл: теорія миттєвої потужності, теорія обмінної потужності, вентиляна потужність, потужності зсуву та спотворення тощо.

Проблемам теорії потужності та її балансування за складовими в колах із несинусоїдальними за формою струмами та напругами присвячена значна кількість публікацій. Найбільше питань виникає навколо "вентильної потужності", без якої неможливо досягнути балансу потужності в процесі енергообміну [6]. Результати досліджень ряду провідних учених у галузі теорії потужності інтегровані в стандарті IEEE [7], що навело лад у трактуваннях, принаймні, арифметично. Йдеться про вдосконалення спектрального методу K.Budeanu, яке стосується забезпечення еквівалентності втрат активної потужності в мережі енергообміну між джерелом та споживачем [8].



Метою роботи є дослідження балансу потужності для РЗН у цілому та тиристорного блоку зокрема в режимах регулювання змінної напруги фазовим керуванням провідного стану двоопераційних тиристорів.

Задача досліджень. Отримати вирази для гармонічних складових струмів і напруг для всіх елементів РЗН та за результатами чисельних розрахунків згідно з методикою [7] зробити обґрунтовані висновки щодо балансів складових потужності та участі в ньому вентиляного блоку.

Виклад основного матеріалу. Згідно з [7] за несинусоїдальної форми струмів та напруг повна (уявна) потужність від джерела живлення балансується такими складовими:

$$S = UI = \sqrt{S_1^2 + S_N^2} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D_I^2 + D_U^2 + S_H^2}, \quad (1)$$

де U, I – середньоквадратичні значення напруги та струму від джерела живлення;

$S_1 = U_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{(U_1 I_1 \cos \varphi_1)^2 + (U_1 I_1 \sin \varphi_1)^2}$ – фундаментальна (за частотою джерела) повна потужність; P_1, Q_1 – активна та реактивна потужності за основною частотою відповідно; U_1, I_1 – середньоквадратичні значення основної гармоніки струму та напруги джерела; φ_1 – фазовий кут між векторами основної гармоніки струму та напруги;

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} = \sqrt{D_I^2 + D_U^2 + S_H^2} = \sqrt{(U_1 I_H)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_H I_H)^2} - \quad (2)$$

не фундаментальна (не основної частоти) повна потужність, $D_I = U_1 I_H$ – потужність спотворення струму; $D_U = U_H I_1$ – потужність спотворення напруги;

$$S_H = U_H I_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} = \sqrt{\left(\sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \varphi_h \right)^2 + \sum_{h \neq 1} (U_h I_h \sin \varphi_h)^2} - \quad (3)$$

повна гармонічна (не основної частоти) потужність; P_H – активна гармонічна (не основної частоти) потужність, D_H – гармонічна потужність спотворення, U_H, I_H – середньоквадратичні значення напруги та струму не основної частоти, U_h, I_h – середньоквадратичне значення гармоніки порядку $h \geq 2$ струму та напруги, φ_h – фазовий кут між векторами струму та напруги однойменної гармоніки h .

Слід акцентувати, що згідно з [7] активна потужність є арифметичною сумою

$$P = P_1 + P_H, \quad (4)$$

а реактивною означена лише потужність Q_1 за основною гармонікою. Базуючись на (1)–(3), проведено аналіз складових потужності для однофазного РЗН на активному навантаженні, який обладнаний повністю керованими зустрічно-паралельно з'єднаними тиристорами (рис. 1). РЗН живиться від джерела заданої синусоїдальної напруги $u_s(t) = U_m \sin(\omega t)$, тиристори VS1, VS2 – ідеальні ключі.

Рівняння балансу потужностей для досліджуваної електричної схеми (рис. 1):

$$S_S^2 = S_R^2 + S_{VS}^2, \quad (5)$$

де S_S – повна потужність, яку видає джерело синусоїдальної напруги, S_R – повна потужність навантаження РН, S_{VS} – повна потужність тиристорного блоку VS.

Розглянемо режим РЗН (рис. 1), повністю керовані тиристори якого відкривають у природні моменти часу ωt_{on} , а закривають – випередженням відносно природніх моментів часу закривання [4, 5]. Часові діаграми струмів та напруг РЗН для такого режиму наведено на рис. 2, де β – кут закривання тиристорів (рис. 2 в).

Для складання балансів потужності за формулами для її складових розкладаємо вирази для мит-

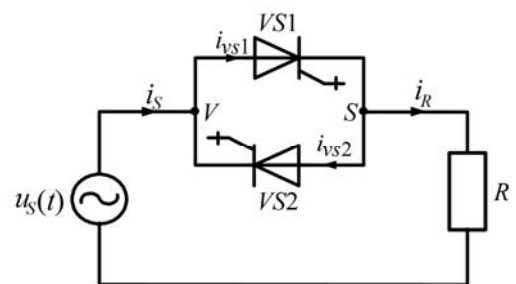


Рис. 1. Еквівалентна схема однієї фази тиристорного регулятора напруги з активним навантаженням

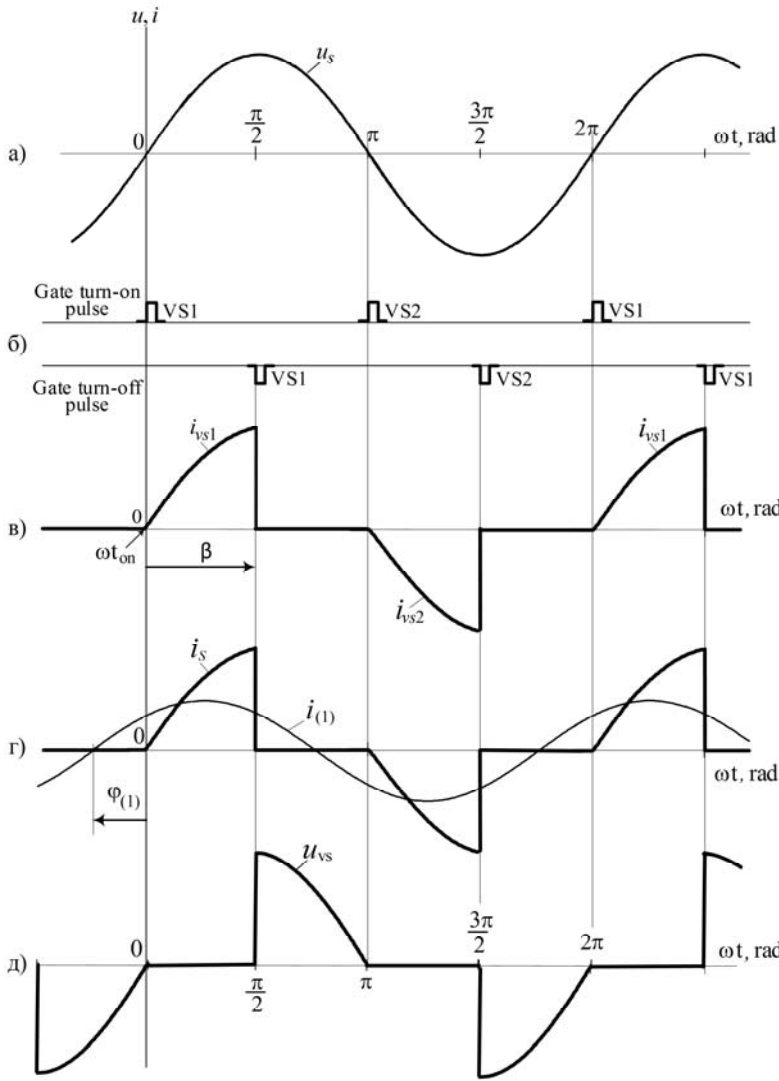


Рис. 2. Часові діаграми струмів і напруг регулятора змінної напруги

тєвих значень струмів та напруг РЗН у тригонометричний ряд Фур'є. Зауважимо, що на проміжках часу провідного стану тиристорів VS1, VS2 струм у схемі описується як $i_S = i_R = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t)$, а в складі потужності синусоїдального джерела напруги живлення будуть відсутні потужність спотворення напруги D_U , гармонічна потужність S_H та її компоненти P_H і D_H .

Виконаємо гармонічний аналіз вхідного струму i_S (рис. 2 з), який розповсюдимо на решту послідовно увімкнених елементів РЗН: сумарний струм тиристорного блоку $i_{VS1,2}$ (рис. 2 в), а також струм та напругу на резистивному навантаженні i_R, u_R . Результати цього аналізу використаємо для визначення складових потужності РЗН. Остаточні вирази для косинусного та синусного коефіцієнтів ряду Фур'є гармоніки порядку n для струму i_S мають вигляд:

$$a_n = \frac{U_m}{2\pi R} \left\{ \frac{1 - \cos(\pi n) - \cos[(1-n)(\pi - \beta)] - \cos[(1-n)(2\pi - \beta)]}{1-n} + \frac{1 - \cos(\pi n) - \cos[(1+n)(\pi - \beta)] - \cos[(1+n)(2\pi - \beta)]}{1+n} \right\}, \quad (6)$$

$$b_n = \frac{U_m}{2\pi R} \left\{ \frac{\sin[(1-n)(\pi - \beta)] + \sin[(1-n)(2\pi - \beta)]}{1-n} - \frac{\sin[(1+n)(\pi - \beta)] + \sin[(1+n)(2\pi - \beta)]}{1+n} \right\}. \quad (7)$$

Звідки для першої гармоніки:

$$a_1 = \frac{U_m}{\pi R} \sin^2 \beta, \quad b_1 = \frac{U_m}{2\pi R} [2(\pi - \beta) + \sin 2\beta]. \quad (8)$$

Результати гармонічного аналізу напруги u_{VS} на блоці тиристорів VS:

$$a_n = \frac{U_m}{2\pi} \left\{ \frac{\cos(\pi n) - \cos(2\pi n) + \cos[(1-n)(\pi - \beta)] + \cos[(1-n)(2\pi - \beta)]}{1-n} + \frac{\cos(\pi n) - \cos(2\pi n) + \cos[(1+n)(\pi - \beta)] + \cos[(1+n)(2\pi - \beta)]}{1+n} \right\}, \quad (9)$$

$$b_n = \frac{U_m}{2\pi} \left\{ \frac{-\sin[(1-n)(\pi - \beta)] - \sin[(1-n)(2\pi - \beta)]}{1-n} + \frac{\sin[(1+n)(\pi - \beta)] + \sin[(1+n)(2\pi - \beta)]}{1+n} \right\}. \quad (10)$$

Звідки для першої гармоніки:

$$a_1 = -\frac{U_m}{\pi} \sin^2 \beta, \quad b_1 = \frac{U_m}{2\pi} (2\beta - \sin 2\beta). \quad (11)$$

Амплітуду та фазу n -ї гармоніки струму (напруги) визначаємо так:

$$C_{1m(n)} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{b_n}{a_n}\right). \quad (12)$$

Розглянемо чисельний приклад розрахунку складових потужності РЗН для таких вхідних даних: напруга живлення $U_S = 220$ В, опір навантаження $R = 1$ Ом, кут закривання тиристорів $\beta = 90$ ел. град, що відповідає максимальному значенню коефіцієнта реактивної потужності [5].

Результати проведеного за формулами (6–12) гармонічного аналізу та визначення складових потужності за виразами (1)–(4) для заданих умов інтегровано у вигляді дерева потужності на рис. 3.

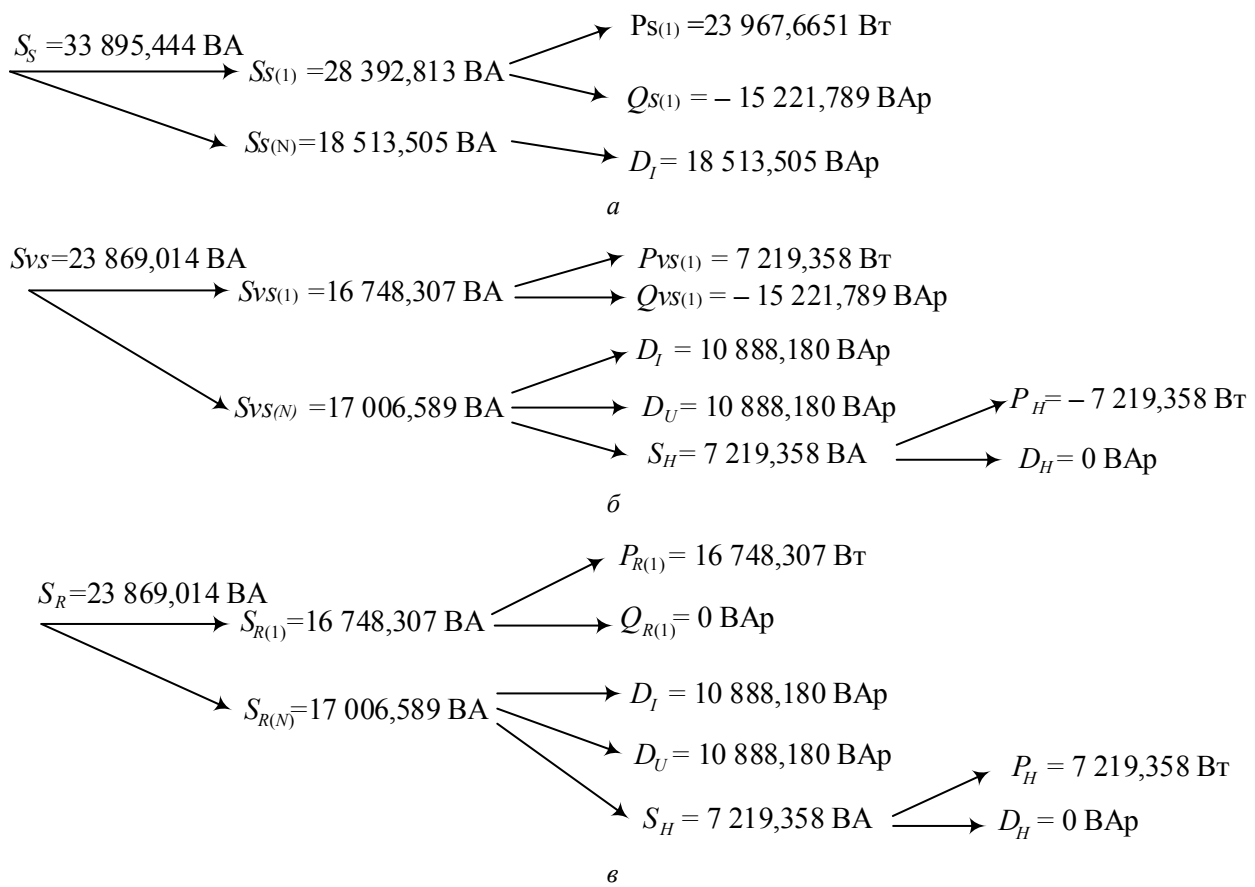


Рис. 3. Дерево потужності та її компонент для: а – джерела живлення; б – тиристорного блоку; в – навантаження регулятора змінної напруги

Основні результати:

1. Середньоквадратичні значення струмів джерела, вентиляного блоку та навантаження: $I = 154,496$ А, основної гармоніки $I_{(1)} = 129,415$ А, гармонічного струму $I_H = 84,384$ А, а фазовий кут для основної гармоніки струму $\varphi_1 = -32,4195$ ел. град. Загальний коефіцієнт гармонічного спотворення струму $THD_I = I_H / I_1 = 84,384 / 129,415 = 0,6520$.

2. Для заданих умов ефективні значення напруги на вентиляному блоці та резисторі навантаження: $U_R = 154,496$ В, напруги основної гармоніки $U_{R(1)} = 129,415$ В, гармонічної напруги $U_{R(H)} = 84,384$ В, а фазовий зсув гармонік струму відносно відповідних гармонік напруги $\varphi_h = 0$ ел. град.

3. Споживання активної потужності, визначене згідно з (4), складає $P_S = 23967,665$ Вт.

4. Реактивна потужність генерації в мережу живлення $Q_{S(1)} = -15\,221,789$ VAR, що для схеми без реактивних елементів означає реактивну потужність зсуву.

5. Баланс активної потужності

$$P_{S(1)} = P_{R(1)} + P_{R(H)} + P_{VS(1)} + P_{VS(H)} = 16748,307 + 7219,358 + 7219,358 - 7219,358 = 23967,665 \text{ Вт.}$$

Гармонічна активна потужність блоку тиристорів $P_{VS(H)}$ від'ємна, оскільки вищі гармоніки струму й напруги перебувають у протифазі, тобто активні потужності всіх гармонік є від'ємними. Але вона компенсується додатною активною потужністю основної гармоніки $P_{VS(1)}$, тому сумарна активна потужність, пов'язана з тиристорним блоком, відсутня. Водночас вищі гармоніки струмів і напруг резистора навантаження перебувають у фазі, і гармонічна потужність навантаження додатна.

6. Повні потужності тиристорного блоку S_{VS} (рис.3 б) та резистивного навантаження S_R (рис. 3 в), а також значення фундаментальних $S_{VS(1)}$, $S_{R(1)}$ і нефундаментальних складових $S_{VS(N)}$, $S_{R(N)}$ потужності чисельно співпадають. Це пояснюється тим, що тиристорний блок є передавальною ланкою між джерелом напруги та навантаженням. Співпадають також вітки? дерев рис.3 б та рис.3 в, які стосуються складових потужності спотворення D_I , D_U . Різниця спостерігається в знаку гармонічної потужності P_H . Реактивна потужність зсуву пов'язана повністю з тиристорним блоком, а активна потужність – з резистором навантаження.

Наведені результати дослідження перевірено моделюванням у середовищі Simulink програмного пакету Matlab.

Висновки. Підтверджено, що, як передбачено в [6], незважаючи на нульове значення миттєвої потужності, з тиристорним блоком пов'язана потужність зсуву, викликана втручанням у природний спосіб протікання струму штучним зсувом струму відносно напруги на частоті живлення шляхом заміни зовнішнім впливом природної комутації ключових елементів їхньою штучною комутацією.

Не фундаментальна складова потужності РЗН пов'язана з гармонічними складовими спотворених струмів та напруг, породжених тиристорним блоком, які віддзеркалені в резисторі навантаження. Уведення складових потужності спотворення, які супроводжують передачу активної потужності від джерела до навантаження, забезпечує адекватність визначення втрат потужності в елементах електропередачі.

1. Интеллектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
2. Жежеленко І.В., Півняк Г.Г., Трофімов Г.Г., Папаїка Ю.А.. Реактивна потужність в електричних мережах. Монографія. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т "Дніпровська політехніка". Дніпро: НТУ "ДП", 2020. 72 с.
3. Шидловський А. К., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Моделювання режимів роботи статичних синхронних компенсаторів реактивної потужності та фазоповоротних трансформаторних пристроїв для створення гнучких систем передачі змінного струму в ОЕС України. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 38. С. 18–29.
4. Fediv Y., Sivakova O., Korchak M. Model of Virtual Source of Reactive Power for Smart Electrical Supply Systems. *IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 1. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE47179.2019.8949159>.
5. Fediv Y., Sivakova O., Korchak M. Multi operated virtual power plant in smart grid. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. 2020. Vol. 5. No. 6. Pp. 256–260. DOI: <https://doi.org/10.25046/aj050630>.
6. Новский В.А., Жарский Б.К., Голубев В.В. Баланс мощностей в электрических цепях с ключевыми элементами. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип 48. С. 103–113.
7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std. 1459–2010.
8. Emanuel A. Power definitions and the physical mechanism of power flow. Hoboken, N.J. *IEEE Press/Wiley*, 2016. 260 p.

COMPONENT CAPACITIES OF THE THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR WITH ACTIVE LOAD

E.I. Fediv, O.M. Sivakova,
Lviv Polytechnic National University,
S. Bandery str., 12, Lviv, 79012, Ukraine
e-mail: yevhen.i.fediv@lpnu.ua

A study of the power balance of the semiconductor voltage regulator on an active load with phase control by two-operation thyristors was carried out. The suitability of its use for simultaneous obtaining of the reactive power resource for distribution electric networks has been confirmed. According to the concept of intelligent electrical networks, such devices belong to the class of flexible alternating current transmission systems, and they can be the basis for building virtual energy sources. The power components for individual components of the regulator, including the thyristor block, were studied. The spectral method of describing currents and voltages at the regulator sections is applied. The obtained results of theoretical studies were confirmed by an example with numerical calculations, which made it possible to clarify the physical essence of energy transformations during voltage regulation. Bibl. 8, fig. 3.

Key words: voltage regulator, two-operation thyristor, electric power, harmonic analysis.

1. Intelligent electrical networks: elements and modes: K.: In-т електродynamiky NAN Ukrainy, 2016. 400 с.
2. Zhezhelenko I.V., Pivniak H.H., Trofimov H.H., Papaika Y.A. Reactive power in electrical networks. Monohrafiia. M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. tekhn. un-т Dniprovska politekhnika. Dnipro: NTU DP, 2020. 72 p.
3. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Novskiy V.O., Malakhatka D.O. Modeling of the operating modes of static synchronous reactive power compensators and phase-reversal transformer devices for the creation of flexible alternating current transmission systems in UES of Ukraine. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2014. Vyp. 38. Pp. 18–29.
4. Fediv Y., Sivakova O., Korchak M. Model of Virtual Source of Reactive Power for Smart Electrical Supply Systems. *IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 1–4. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE47179.2019.8949159>.
5. Fediv Y., Sivakova O., Korchak M. Multi operated virtual power plant in smart grid. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. 2020. Vol. 5. No. 6. Pp. 256–260. DOI: <https://doi.org/10.25046/aj050630>
6. Novskiy V.A., Zharskiy B.K., Holubiev V.V. Power balance in electrical circuits with key elements. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2011. Vyp 48. Pp. 103–113.
7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std. 1459–2010.
8. Emanuel A. Power definitions *and the physical mechanism of power flow*. Hoboken, N.J : IEEE Press. Wiley, 2016. 260 p.

Надійшла: 09.07.2024
Прийнята: 23.07.2024

Submitted: 09.07.2024
Accepted: 23.07.2024