

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НАПРУГ У РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ 0,38/0,22 кВ

Олександр Мірошник, д. т. н.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства  
ім. П. Василенка,  
вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, e-mail: omiroshnyk@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.090>

### **Мірошник О. Дослідження симетричних складових напруг у розподільній мережі 0,38/0,22 кВ**

У статті розглянуто проблему несиметричних режимів у мережах 0,38/0,22 кВ. Аналіз показав, що несиметрія струмів зумовлена роботою комунально-побутового навантаження, основну частину якого складають нерівномірно розподілені по фазах однофазні електроприймачі. Визначення величини несиметрії в мережі дозволяє уточнити рівень втрат електроенергії. В окремих Обленерго втрати в мережах 0,38/0,22 кВ сягають до 15 % від відпущеної електроенергії в мережу, а показники якості електроенергії перевищують допустимі значення у 2–4 рази. В європейських країнах вважається, що якщо втрати електроенергії перевищують 7–9 %, то така передача електричної енергії є неефективною. Тому виникла необхідність розробки нових методів та заходів щодо покращання показників якості електричної енергії та застосування відповідних заходів для зниження втрат.

Сучасний рівень комп'ютерної техніки дозволяє в реальному часі виконувати обчислення цих втрат, тому виникає необхідність створити математичний апарат, який ляже в основу програмного продукту з розрахунку несиметрії в мережах 0,38/0,22 кВ. Запропоновано матричний метод розрахунку симетричних складових напруги мережі 0,38/0,22 кВ, який може бути покладений в основу математичного апарату для розробки програмного продукту з розрахунку несиметрії напруг. Показано, що в системі симетричних координат відповідні матриці струмів і напруг містять складові прямої, зворотної та нульової послідовностей. Також досліджено, що опір прямої і нульової послідовностей трифазної лінії знаходиться розрахунковим або дослідним шляхом, причому опори прямої і зворотної послідовностей для ліній однакові, а опір нульової послідовності може в 2-3 рази перевищувати опір прямої послідовності. Це зумовлено різницею величин е.р.с. взаємної індукції, що наводяться у фазі струмами прямої та нульової послідовностей, що протікають по двох інших фазах.

**Ключові слова:** несиметрія струмів, несиметрія напруги, втрати електричної енергії.

### **Miroshnyk O. Research of symmetric components of voltage in the distribution network 0,38 / 0,22 kV**

The article deals with the problem of asymmetrical modes in 0,38 / 0,22 kV networks. It is shown that the asymmetry of the currents is caused by the work of communal-household load, the main part of which is unevenly distributed in the phases of single-phase electric receivers. Determining the amount of asymmetry in the network allows specifying of the level of electricity losses. In some electricity companies, losses in the 0,38 / 0,22 kV networks reach up to 15 % of the electricity supplied to the grid, and the electricity quality indicators exceed the allowable values by 2–4 times. In European countries, it is considered that if electricity losses exceed 7–9 %, then such electricity transmission is considered inefficient. Therefore, it became necessary to develop new methods and measures to improve the quality of electricity and to take appropriate measures to reduce losses.

The research proposes a mathematical method for calculating the symmetric components of the 0,38 / 0,22 kV network voltage, which can be the basis of a mathematical apparatus for developing of a software product, designed for calculation of voltage asymmetry. It is shown that in the system of symmetric coordinates the corresponding current and voltage matrices contain components of forward, reverse and zero sequences. It was also investigated that the resistance of the straight and zero sequences of the three-phase line is calculated or experimentally studied, with the resistance of the forward and reverse sequences for the lines being the same, and the resistance of the zero sequence can be 2-3 times greater than the resistance of the direct sequence. It is caused by the difference in the values of the emf mutual induction, induced in the phase by currents of direct and zero sequences flowing in the other two phases.

**Key words:** current asymmetry, voltage asymmetry, loss of electrical energy.

**Постановка проблеми.** Проблема поліпшення якості та зменшення додаткових втрат електричної енергії, викликаних відхиленням показників якості електричної енергії від допустимих значень, є актуальною в сільських електричних мережах напругою 0,38/0,22 кВ. Аналіз

режимів роботи сільських мереж напругою 0,38/0,22 кВ [1; 2; 4; 6] показав, що несиметрія струмів зумовлена роботою комунально-побутового навантаження, основну частину якого становлять нерівномірно розподілені за фазами однофазні електроприймачі. Тому знання вели-

чини несиметрії в мережі дає змогу уточнити рівень втрат електроенергії та застосувати відповідні заходи щодо їх зниження. Сучасний рівень комп'ютерної техніки дозволяє в реальному часі виконувати обчислення цих втрат, тому виникає необхідність створити математичний апарат, який ляже в основу програмного продукту з розрахунку несиметрії в мережах 0,38/0,22 кВ.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Підвищення якості електроенергії можна домогтися різними способами і засобами [1; 2; 6]. При цьому кожен із них має свої переваги й недоліки. Наприклад, застосуванням такого способу, як перерозподіл однофазних навантажень, не вдається мінімізувати випадкову несиметрію струмів (хоча додаткові втрати потужності знижуються на 15–20%). До того ж випадкова несиметрія струмів характеризується імовірнісним режимом роботи приєднаних однофазних приймачів і є постійно діючим фактором у мережах 0,38 кВ навіть за однакової сумарної потужності фаз.

Прагнення до скорочення протяжності розподільних мереж може призвести до їх формування як розгалужених радіальних мереж. Такі мережі, як відомо, мають низку особливостей. По-перше, струмові навантаження однієї і тієї ж лінії, наприклад, на початку її і в кінці, досить різні, що може призводити до ускладнень налаштування чутливості захисту розподільних мереж від коротких замикань. По-друге, істотно відрізняються між собою значення напруги в різних точках мережі, що є однією з основних причин, які ускладнюють завдання забезпечення належної якості електричної енергії у споживачів.

На сьогодні несиметричні режими роботи сільських розподільних мереж 0,38 кВ вивчені не повною мірою у зв'язку з труднощами, що виникають під час експериментальних досліджень у діючих мережах, і відсутністю сучасних методів розрахунку цих режимів [3; 4; 5; 7].

Розрахунок розподілу симетричних складових напруг розгалуженої розподільної мережі 0,38/0,22 кВ досить складний [3; 5; 7; 11; 13]. Обчислення параметрів усієї мережі або її частини до розрахункової точки вкрай громіздке і пов'язане, як правило, з необхідністю виконання операцій з великою кількістю матриць. Тому розв'язання задачі за допомогою ручного рахунку навіть для відносно нескладних схем вимагає значних затрат праці й часу.

**Постановка завдання.** Наше завдання – визначити в загальному вигляді межі розподілу

значень симетричних складових напруг мережі 0,38/0,22 кВ за несиметричного режиму навантаження.

**Виклад основного матеріалу.** Широке впровадження комп'ютерної техніки висуває вимогу розробки й застосування таких методів розрахунку, які, незважаючи на можливу громіздкість арифметичних операцій, були б достатньо простими в розв'язанні задачі в загальному вигляді і давали б максимальну циклічність рахунку.

Виходячи з цього розглянуто можливість застосування для розв'язання цієї задачі методу вузлових потенціалів.

У загальному вигляді рівняння методу вузлових потенціалів у матричній формі має вигляд [1; 8; 10; 12; 16]:

$$\mathbf{YU} = \mathbf{I} \quad (1)$$

або

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{Y}$  – матриця вузлових провідностей;  $\mathbf{U}$  – вектор вузлових потенціалів;  $\mathbf{I}$  – вектор струмів незалежних еквівалентних вузлових джерел.

Матриці струмів та напруг у будь-якій точці мережі мають фазні значення [4; 6]:

$$\dot{\mathbf{U}} = \begin{pmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}}_s = \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{pmatrix}. \quad (3)$$

У системі симетричних координат відповідні матриці струмів і напруг містять складові прямої, зворотної та нульової послідовностей:

$$\dot{\mathbf{U}}_s = \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}}_s = \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

З (2) напруга будь-якого вузла може бути отримана за правилом Крамера [6; 9; 14]:

$$\dot{U}_k = \frac{1}{\Delta} \sum \Delta_{ik} \dot{U}_{ik} Y_{ik}, \quad (5)$$

де  $\Delta$  – визначник  $\mathbf{Y}$ -матриці провідностей;  $\Delta_{ik}$  – алгебраїчне доповнення елемента  $Y_{ik}$  матриці провідностей.

Елементи  $Y$ -матриці з однаковими індексами ( $pp$ ), що стоять на перетині  $p$ -ї стрічки та  $p$ -го стовпчика, являють собою провідності елементів схеми, які приєднані до вузла  $p$ . Елементи матриці з різними індексами ( $pq$ ), що стоять на перетині  $p$ -ї стрічки та  $q$ -го стовпчика, являють собою провідності елементів схеми, що включені між вузлами  $p$  та  $q$  і взяті з від'ємним знаком.

У разі одностороннього живлення відповідно отримаємо [6; 15]:

$$\dot{U}_\kappa = \frac{1}{\Delta} \Delta_{1\kappa} \dot{U}_{ul} Y_{ul}. \quad (6)$$

Відносна напруга у вузлі  $\kappa$ :

$$\dot{U}_{*\kappa} = \frac{U_\kappa}{U_{kl}} = \frac{\Delta_{1\kappa}}{\Delta} Y_{ul}. \quad (7)$$

Якщо мережа простої конфігурації, то матриця провідностей  $Y$  відносно легко записується за допомогою попередньої побудови схем заміщення або графіків. У разі мережі складної конфігурації стає доцільно процес запису матриці  $Y$  автоматизувати за допомогою комп'ютерних засобів. Беручи до уваги викладений принцип запису елементів матриці, алгоритм передбачає

формування її за заданими  $Z_\kappa = r_\kappa + jx_\kappa$  – опорамі елементів мережі.

Опір прямої і нульової послідовностей трифазної лінії знаходять розрахунковим або дослідним способом, причому опори прямої і зворотної послідовностей для ліній однакові, а опір нульової послідовності може у 2-3 рази перевищувати опір прямої послідовності. Пояснюється це різницею величин е.р.с. взаємної індукції, що наводяться у фазі струмами прямої та нульової послідовностей, що протікають по двох інших фазах.

На рис. 1 показано графік симетричних складових струмів для несиметричного режиму, коли

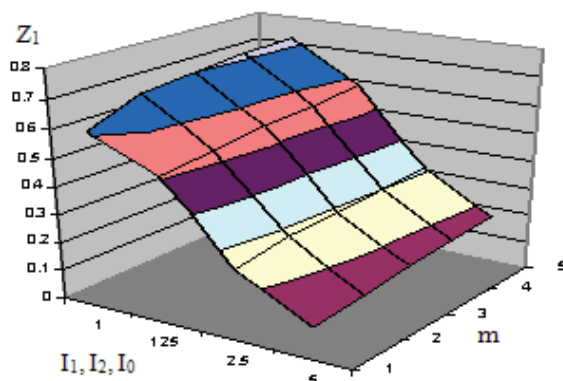
$$Z_A = Z \text{ і } Z_B = Z_C = \infty$$

у функції

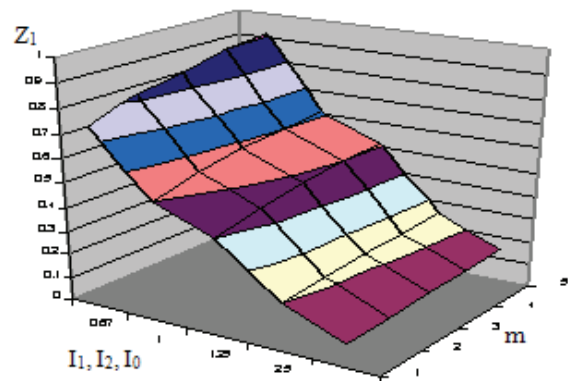
$$m = \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}; n = \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{0\Sigma}} \text{ і } Z_{1\Sigma},$$

де  $Z_{1\Sigma}$ ,  $Z_{2\Sigma}$ ,  $Z_{0\Sigma}$  – сумарні опори схем відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей.

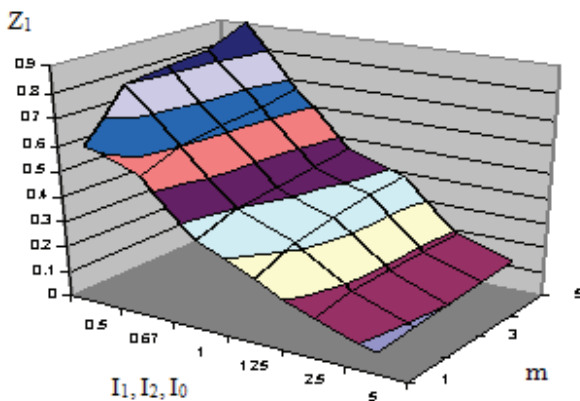
На рис. 2 показані графіки характеристик несиметричного режиму для випадку, коли  $Z_A = \infty$  і  $Z_B = Z_C$ .



а) при  $n = 0,3$



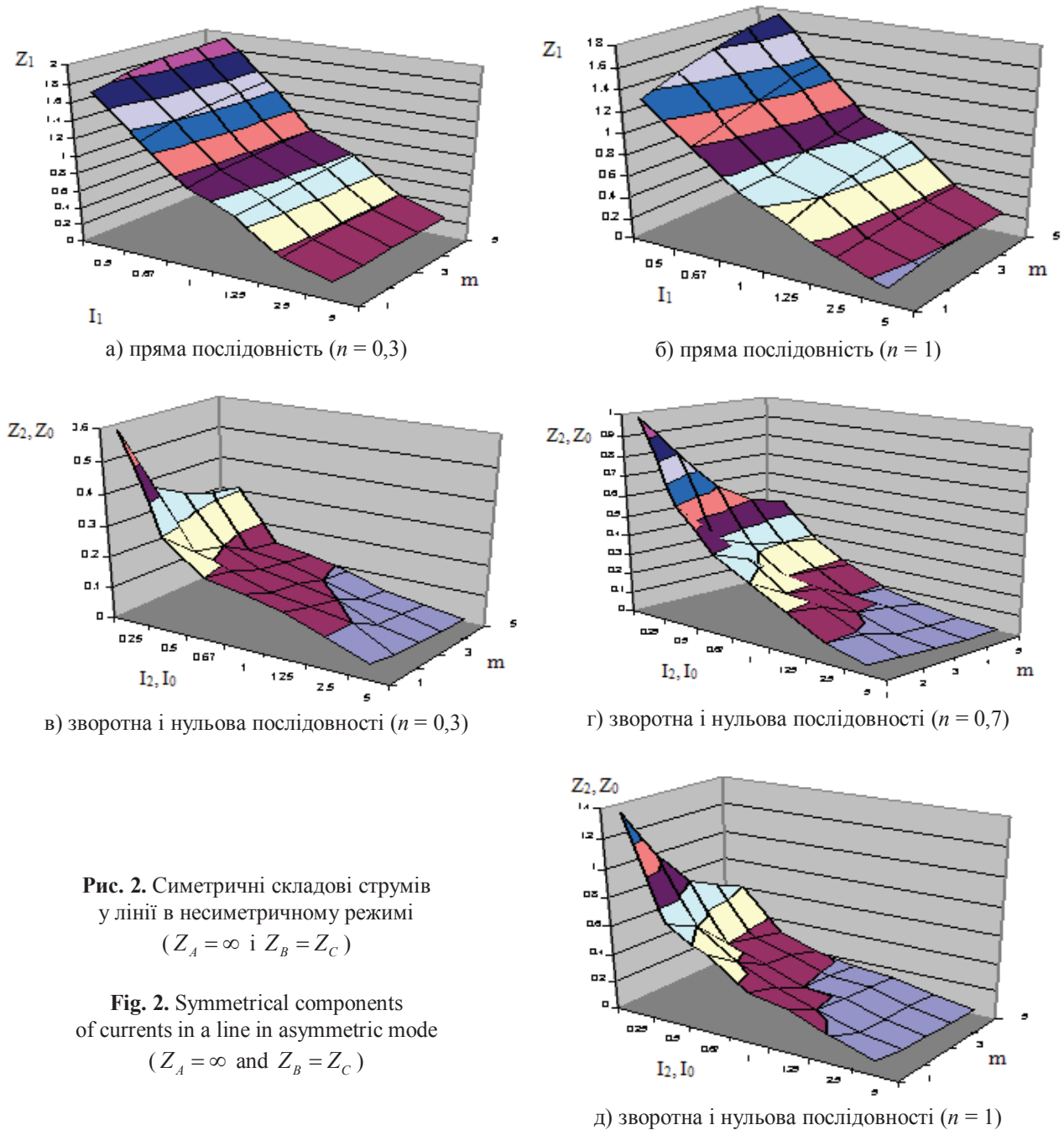
б) при  $n = 0,5$



в) при  $n = 1$

**Рис. 1.** Симетричні складові струмів у лінії в несиметричному режимі ( $Z_A = Z$ ,  $Z_B = Z_C = \infty$ )

**Fig. 1.** Symmetrical components of currents in a line in asymmetric mode ( $Z_A = Z$ ,  $Z_B = Z_C = \infty$ )



**Рис. 2.** Симетричні складові струмів у лінії в несиметричному режимі ( $Z_A = \infty$  і  $Z_B = Z_C$ )

**Fig. 2.** Symmetrical components of currents in a line in asymmetric mode ( $Z_A = \infty$  and  $Z_B = Z_C$ )

**Висновки.** Дослідження показали, що опори прямої і зворотної послідовностей для мережі 0,38/0,22 кВ однакові, а опір нульової послідовності може у 2-3 рази перевищувати опір прямої послідовності. Пояснюється це різницею величин е.р.с. взаємної індукції, що наводяться у фазі струмами прямої та нульової послідовностей, які протікають по двох інших фазах. Розроблений метод розрахунку розподілу симетричних складових напруги мережі 0,38/0,22 кВ може бути покладений в основу програмного продукту з розрахунку несиметричних режимів.

### Бібліографічний список

1. Богатырев Л. Л., Манусов В. З., Содномдорж Д. Математическое моделирование режимов ЭЭС в условиях неопределенности. Улан-Батор: Изд-во типографии МГТУ, 1999. 348 с.
2. Левин М. С., Лещинская Т. Б. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ. *Электричество*. 1999. №5. С. 18–22.
3. Лежнюк П. Д., Бурыкин А. Б., Кулик В. В. Определение потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем от транзитных перетоков. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Спец. вип.: Енергетичні ринки – перехід до нової моделі ринку

- двосторонніх контрактів і балансуючого ринку. 2009. С. 31–36.
4. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Поліщук А. Л. Інформаційне забезпечення розрахунку втрат електроенергії в розподільних мережах. *Вісник ХНТУСГ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. Вип. 57, т. 1. С. 17–21.
5. Мірошник О. О. Методи та підходи до розрахунку втрат електричної енергії в розподільчих електричних мережах. *Праці Таврійського державного аеротехнологічного університету*. Вип. 7, т. 3. С. 31–36.
6. Савина Н. В. Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях : монография / отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2008. 228 с.
7. Chitra R. Neelaveni R. A Realistic Approach for Reduction of Energy Losses in Low Voltage Distribution Network. *International Journal of Electrical Power & Energy System*. 2011. 33. P. 377–384. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.08.033>.
8. Dilek M., Broadwater R. P., Thompson J. C., Sequin R. Simultaneous Phase Balancing at Substations and Switches with Time-Varying Load Patterns. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2001. 16. P. 922–928. doi: <https://doi.org/10.1109/59.962447>.
9. Erturk A. T. Manufacturing of Al-Zr Thermal-Resistant Alloys for Transmission Lines. *Acta Physica Polonica*. 2017. No. 127. P. 1292–1294. doi: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.1292>.
10. Faiz J., Ebrahimpour H. Influence of Unbalanced Voltage Supply on Efficiency of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor and Economic Analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. 47. P. 289–302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.04.009>.
11. Faiz J., Ebrahimpour H. Precise Derating of Three-Phase Induction Motors with Unbalanced Voltages. *Energy Conversion and Management*. 2007. 48, P. 2579–2586. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.023>.
12. Karabay S. Enhancement on Al-Mg-Si Alloys against Failure Due to Lightning Arc Occurred Inenergy Transmission Lines. *Engineering Failure Analysis*. 2013. 31. P.153–160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.005>.
13. Miroshnyk O., Trunova I., Savchenko O. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2018 - Proceedings 2018-January*. 2018. P. 161–165. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559553.
14. Miroshnyk O. O., Tymchuk S. O. Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms, *Technical Electrodynamics*. 2013. Issue 4. P. 67–73. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885913005&partnerID=MN8TOARS> (Last accessed: 15 September 2019).
15. Tavakoli Bina M., Kashefi A. Three-Phase Unbalance of Distribution Systems: Complementary Analysis and Ex-perimental Case Study. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2011. No. 33. P. 817–826. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.12.003>.
16. Thyristor Converter as a Means of Upgrading the Single-Phase Furnace. URL: <http://www.elec.ru/articles/tiristornyj-preobrazovatel-kak-sredstvo-modernizac/> (Last accessed: 15 September 2019).

Стаття надійшла 21.09.2019