



DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-8

УДК 621.316

А. О. Панов<sup>1</sup>, аспірант

ORCID: 0000-0002-0688-1430

С. Д. Гриценко<sup>1</sup>, ст. викладач

ORCID: 0009-0005-2204-6119

С. В. Галько<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

<sup>1</sup> Державний біотехнологічний університет<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: panovanton1994@gmail.com, тел.: +380632134380

## РОЗРОБКА НЕЧІТКОГО АЛГОРИТМУ РЕГУЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЕНТІВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ ЗА ЗВОРотноЮ І НУЛЬОВОЮ ПОСЛІДОВНОСТЯМИ

*Анотація.* У цій роботі наведено результати дослідження застосування нечітких алгоритмів керування для нормалізації коефіцієнтів несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовностями в електромережі. Розроблено моделювання системи у нечіткій логіці, де представлено функції приладдя для термі вхідної і вихідної змінних. Представлене графічне регулювання правил вхідних змінних, де чітко видно перемикання комутації. Наведені евристичні знання аналізованої проблемної галузі логічного висновку для нормалізації коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовності. Показано ефективність представлених алгоритмів з урахуванням моделювання.

*Ключові слова:* якість електроенергії, коефіцієнт несиметрії напруги, нечіткість, алгоритм регулювання, зворотна та нульова послідовності.

*Постановка проблеми.* Однією з актуальних проблем трифазних електричних мереж напругою 0,4 кВ є несиметрія напруги. Несиметрія напруги виражається в нерівності між собою модулів векторів фазних напруг і кутів зсуву між ними. З теоретичних основ електротехніки відомо, що несиметричну систему напруг можна представити як геометричну суму трьох симетричних систем напруг: так званих складових прямої, зворотної та нульової послідовностей [1]. Складова прямої послідовності є шуканою, при додаванні до якої складових зворотної та нульової послідовностей виходить несиметрична система напруг. Основною причиною несиметрії напруги у сільських електричних мережах є поява складової нульової послідовності, оскільки наявність цієї складової обумовлено перебігом струму в нульовому дроті, який, своєю чергою, виникає при нерівномірній навантаженні фаз мережі – звичайному явище у сільській місцевості.



Несиметрія напруги є одним із показників, за яким оцінюють якість електричної енергії у трифазних електричних мережах напругою 0,4 кВ відповідно до ДСТУ EN 50160:2014 [2]. За цими нормами коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю не повинен перевищувати 4%. Несиметрія напруги призводить до різкого зниження ефективності трифазних асинхронних двигунів. Оскільки асинхронні двигуни становлять найбільшу частину промислових навантажень, то несиметрію напруги слід ретельно вивчати та контролювати [3].

*Аналіз останніх досліджень.* Одним із варіантів усунення несиметрії напруг у сільських електричних мережах напругою 0,4 кВ є використання спеціальних пристроїв симетрування напруги [4]. Воно дозволяє знижувати несиметрію напруг у трифазній мережі, безпосередньо впливаючи на величину фазної напруги. Пристрій симетрування напруги включається в лінію електропередачі і коригує величину напруги і зсув фаз між ними шляхом здійснення вольтодобавки. Завдяки цьому пристрою є можливість активно впливати на несиметрію напруги пропорційно її величині. На входи А1, В1, С1 подається фазна напруга, а з виходів А2, В2, С2 знімається симетрична трифазна система напруг. Теоретично пристрій здатний усувати несиметрію напруги до 100% і може ефективно застосовуватися як для індивідуального, так і для групового поліпшення якості електроенергії за величиною несиметрії, підвищуючи таким чином рівень енергозбереження та ресурсозбереження в сільських електричних мережах в цілому.

Також одним із способів зниження несиметрії напруг є вирівнювання навантажень по фазах [5]. Технічним рішенням цього способу є запровадження додаткового міжфазного змінного опору. У роботі [6] виявлені залежності дозволяють визначитися з напрямом та порядком зміни значень опорів. При цьому стає відомим, як зміняться значення лінійних напруг, що дозволить знайти правильний напрямок для зменшення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності. Варіюючи даними залежностями, можна підібрати кінцеві значення міжфазних опорів, при яких значення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності стане в межах, що нормуються ДСТУ EN 50160:2014. У роботах [7] досліджуються залежності коефіцієнтів несиметрії напруг по зворотній [8] послідовності для високої та низької напруги від потужності силового трансформатора. У ході експерименту при зменшенні потужності трансформатора на низькій нарузі коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності збільшується, а на високій – зменшується. Причому дані залежності спостерігаються при різних потужностях джерела напруги, різниця лише в тому, що при вищій потужності



джерела залежності як для високої, так і для низької напруги починаються з менших значень коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності.

Збільшення коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності в мережі низької напруги при зниженні потужності трансформатора можна пояснити тим, що потужність навантаження зростає щодо потужності трансформатора і запас по потужності трансформатора зменшується. Зменшення коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності в мережі напруги 10 кВ при зниженні потужності трансформатора можна пояснити тим, що потужність джерела напруги щодо потужності трансформатора збільшується і, відповідно, збільшується запас по потужності джерела живлення.

Ще одним технічним рішенням вирівнювання навантажень за фазами є введення симетруючого пристрою трансформаторного типу. Реалізується за допомогою зміни величини ємності конденсатора або індуктивності котушки. Проведені дослідження, описані у статті [7], показали, що такий симетруючий пристрій дозволяє знизити несиметрію напруги до тих значень, які нормуються ДСТУ EN 50160:2014. Відповідно, наведені способи регулювання застосовуються після того, як на підставі вимірів проведено оптимальну перекомутацію споживачів [9-11].

*Формулювання мети статті.* Метою дослідження є підвищення якості електроенергії шляхом регулювання коефіцієнтів несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовністю.

*Основна частина.* Згідно з ДСТУ EN 50160:2014 [2] відомо, що значення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності дорівнює:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{HM}} \cdot 100,$$

де  $U_{HM}$  – номінальне значення міжфазної напруги. В Україні дорівнює  $U_{HM} = 380\text{В}$  для чотирипровідної ЛЕП;

$U_{2(1)}$  – значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, що діє.

Чинне значення напруги зворотної послідовності знаходиться за формулою:

$$U_{2(1)} = 0,62 \cdot (U_{M \max} - U_{M \min}),$$

де  $U_{M \max} = \max(U_{AB}; U_{AC}; U_{BC})$ ;

$U_{M \min} = \min(U_{AB}; U_{AC}; U_{BC})$ .

Аналогічним методом є значення коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю:

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{H\Phi}} \cdot 100,$$

де  $U_{H\phi}$  – номінальне значення фазної напруги. В Україні дорівнює  $U_{HM} = 200\text{В}$  для чотирипровідної мережі;

$U_{0(1)}$  – значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг.

Чинне значення напруги зворотної послідовності знаходиться за виразом:

$$U_{0(1)} = 0,62 \cdot (U_{\phi_{\max}} - U_{\phi_{\min}}),$$

де  $U_{\phi_{\max}} = \max(U_A; U_B; U_C)$ ;

$U_{\phi_{\min}} = \min(U_A; U_B; U_C)$ .

Для регулювання коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовності можна скористатися алгоритмом керування на основі нечіткої логіки. При цьому для моделювання системи раціонально застосувати Fuzzy Logic Toolbox, що входить до пакету MATLAB. Коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовності "K2U" і "K0U" подаються в нечіткій формі, як це запропоновано в [11-13], а вихідним параметром є нечітка змінна: "увімкнення приладу комутації". Як терм-множини для нечітких змінних "коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності" використовується безліч  $T_k = \{ "K2Un", "K2Uh" \}$  (рис. 1).

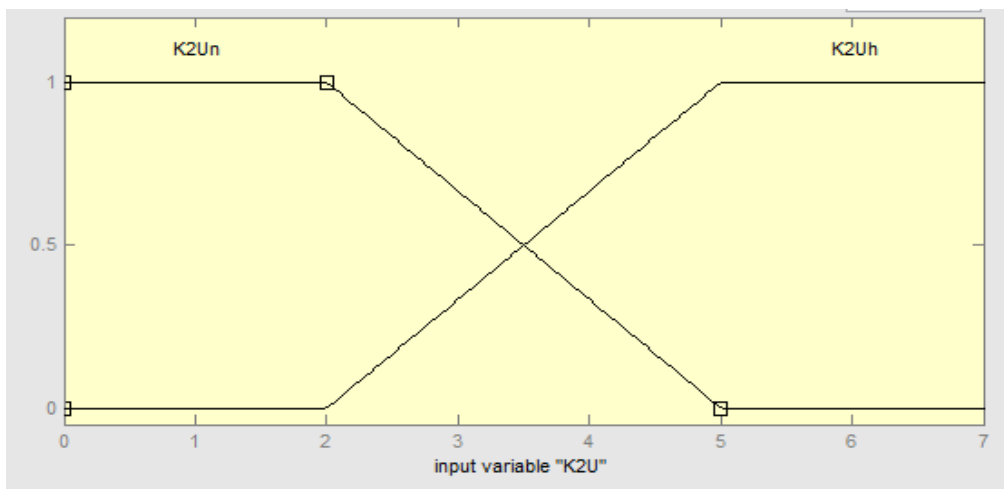


Рис. 1. Функції приладдя для термів вхідної змінної "K2U"

Так само як терм-множини для нечітких змінних: "коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю" використовується множина  $T_k = \{ "K0Un", "K0Uh" \}$  (рис. 2).

Слід зазначити, що функції приналежності термів-множини  $T_k$  обрані відповідно до норм стандартів [2] і виглядають так:

$$\mu_{K_{2Un}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{5-k}{3} \right\} \right\}; \quad \mu_{K_{0Un}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{5-k}{3} \right\} \right\};$$
$$\mu_{K_{2Uh}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{k-2}{3} \right\} \right\}; \quad \mu_{K_{0Uh}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{k-2}{3} \right\} \right\}.$$

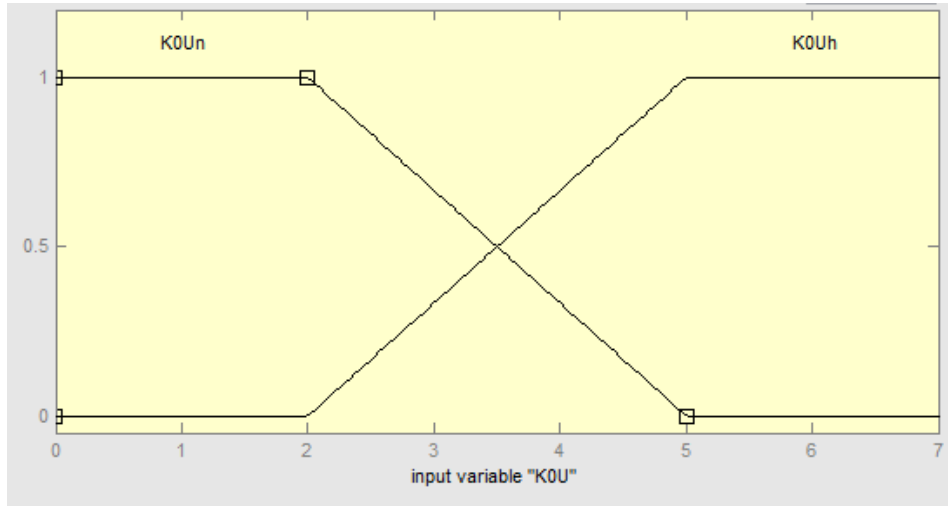


Рис. 2. Функції приладдя для термів вхідної змінної "KOU"

При цьому кожен із термів перших двох змінних оцінюються за шкалою коефіцієнта несиметрії від 0% до 5%. Для нечіткої вихідної змінної "Переключення комутації" використовується безліч  $T_o = \{\text{"Переключення комутації"}\}$  (рис. 3) і оцінюється за шкалою від 1 до 2.

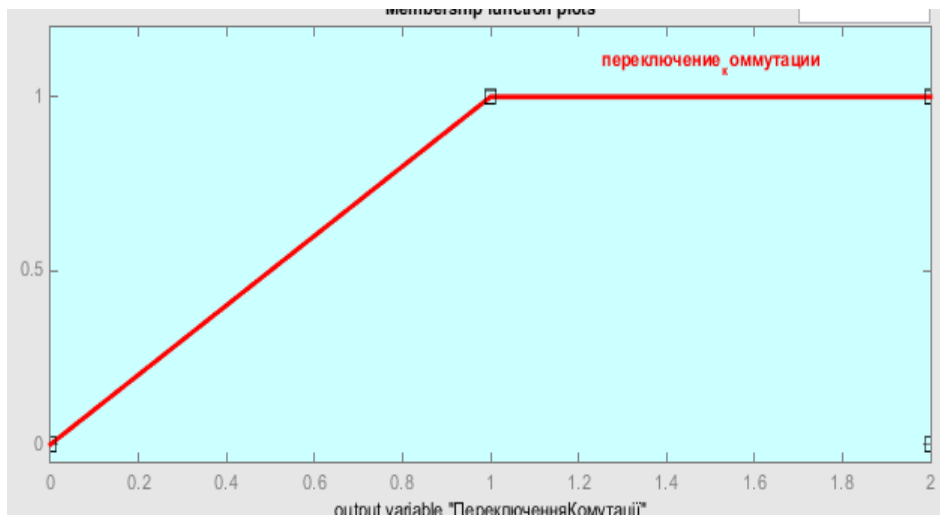


Рис. 3. Функція приладдя для термів вихідної змінної "Переключення комутації"

В електромережі можна певною мірою змінити лише ці два показники якості [14-16]. Передбачається, що трансформаторна підстанція укомплектована пристроєм РПН і можливість змінити комутацію споживача до фаз, тобто. змінити навантаження у фазах у автоматичному режимі або вручну [17].

Евристичні знання аналізованої проблемної галузі логічного висновку для нормалізації коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовності наведені у правилах нижче:

- 1) if ( $K2U_n$  or  $K0U_n$ ) then "Переключення комутації";
- 2) if ( $K2U_h$  or  $K0U_h$ ) then "Переключення комутації".

Після завдання правил нечіткого висновку отримуємо результат для конкретних значень вхідних змінних. Після зміни значень вхідних змінних розглядаються результати виконаних змін (рис. 4). Оскільки процес нечіткого моделювання передбачає аналіз результатів нечіткого висновку при різних значеннях вхідних змінних з метою встановлення адекватності розробленої нечіткої моделі, тому були розглянуті інші випадки. На правилі 1 представлені запроваджені значення "K2U" на 1,19 % ( $K2U_n$ ) тобто зниження, і навіть значення "K0U" на 3,6 % ( $K0U_h$ ) тобто. підвищення, то цьому випадку розроблена система нечіткого висновку рекомендує здійснити "Перемикання комутації". Так само, на правилі 2 видно, що коли значення K2U має низький коефіцієнт, а K0U має високий коефіцієнт несиметрії, то перемикання комутації не обов'язково.

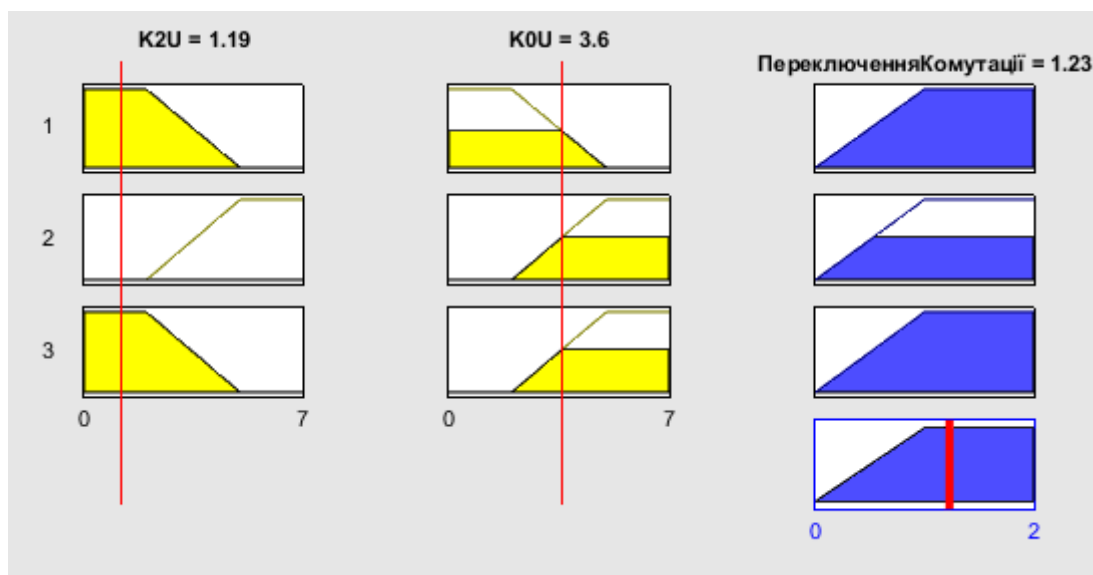


Рис. 4. Переключення комутації

Тобто при зміні коефіцієнта несиметрії напруги зворотної або нульової послідовності здійснюватиметься комутація [18]. Несиметрія як по зворотній, так і по нульовій послідовності вирішується однаково – перемиканням комутації споживачів між фазами.

Графічний інтерфейс перегляду поверхні нечіткого виведення (рис. 5). Який показує, що при зміні коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній і нульовій послідовності буде здійснюватись комутація [19, 20]. Несиметрія по зворотній, так само і по нульовій послідовності вирішується однаково, тобто, за допомогою трансформаторної підстанції, яка укомплектована пристроєм РПН, який має змогу зміни комутації споживача до фаз, тобто перемиканням комутації споживачів між фазами.

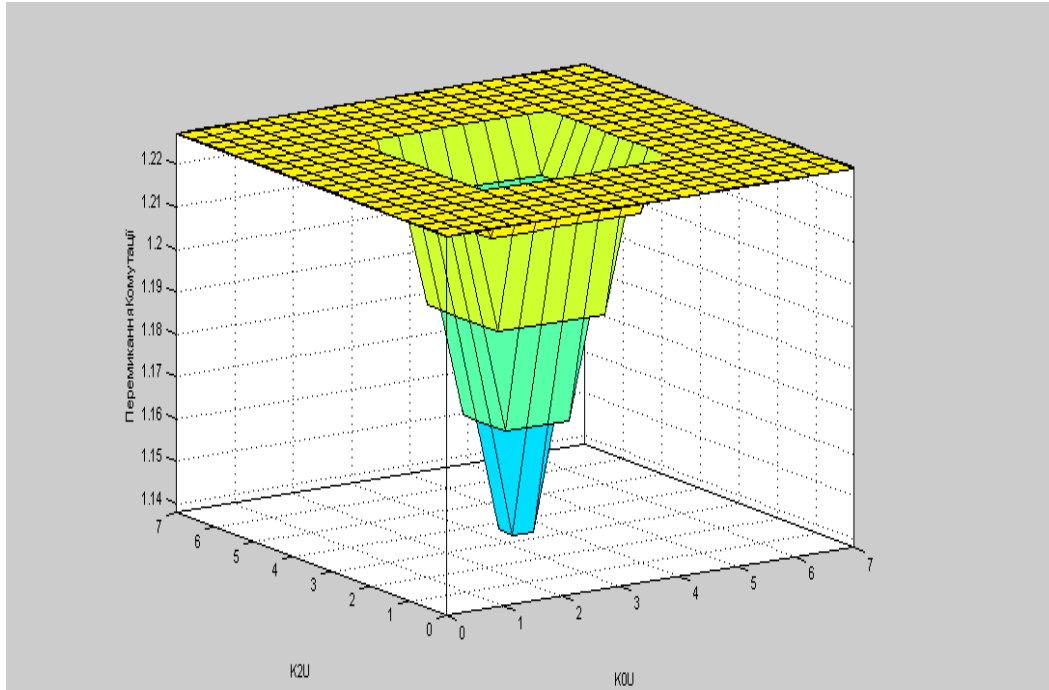


Рис. 5. Графічний інтерфейс перегляду поверхні нечіткого виведення для "Переключення комутації"

*Висновки.* Застосування алгоритму управління на основі нечіткої логіки дає можливість регулювати коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовністю. Дає можливість оперувати нечіткими вхідними даними, і навіть можливість проведення якісних оцінок як вхідних даних, і вихідних результатів. У той же час дає можливість запобігання появі критичних режимів по несиметрії. Апаратна реалізація даного алгоритму може бути впроваджена у програмовану логічну інтегральну схему, що буде розглянуто у наступних роботах.

#### *Список використаних джерел*

1. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1: конспект лекцій / В. Г. Мадьяров [та ін.]. Вінниця: ВНТУ, 2018. 154 с.
2. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристика напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. На заміну ДСТУ EN 20160:2010. [Чинний від 2014-05-20]. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 32 с.
3. Електропостачання: навч. посібник / Ф. П. Шкрабець [та ін.] Дніпро: НГУ, 2015. 540 с.
4. Мірошник О. О. Шляхи вирішення проблеми несиметрії напруги в сільських електромережах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2011. Вип. 11, т. 3. С. 30–34.
5. Дослідження регулювання коефіцієнтів несиметрії напруги зворотної і нульової послідовності за допомогою нечіткого алгоритму



управління. *Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі* : матеріали XVI міжнар. форуму молоді (м. Харків, 25 берез. 2020 р.). Харків, 2020. С. 148.

6. Дослідження регулювання коефіцієнтів несиметрії напруги нульової та зворотної послідовностей. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023* : IX міжнар. науково-практ. конф. молодих уч., аспірантів і студентів (м. Київ, 19 квіт. 2023 р.). Київ, 2023. С. 5–6.

7. Зорін В. В. Оцінка взаємовпливу статичних характеристик вузла навантажень і оптимальних розв'язків математичних моделей зменшення несиметрії та відхилень напруги. *Електроенергетичні системи та установки*. 2009. № 12. С. 35–37.

8. Регулювання коефіцієнтів несиметрії напруги нульової та зворотної послідовності в електричних мережах 0,4 кВ. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2020* : VII міжнар. науково-практ. конф. молодих уч., аспірантів і студентів (м. Київ, 22 квіт. 2020 р.). Київ, 2020. С. 16–17.

9. Нечітка оцінка несиметричних режимів роботи сільських мереж 0, 38/0, 22 кВ / С. О. Тимчук та ін. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2014. Т. 1, № 1. С. 71–73.

10. Miroshnyk O., Tymchuk S. Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodyamika*. 2013. Vol. 1(4). P. 67.

11. Tymchuk S., Miroshnyk O. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2015. Vol. 3, № 4(75). P. 26–31.

12. Pazyi V., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Savchenko O, Halko S. Analysis of technical condition diagnostics problems and monitoring of distribution electrical network modes from smart grid platform position. *IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. e9250080. P. 57-60. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250080>.

13. S. Halko O. Suprun O. Miroshnyk O. Influence of temperature on energy performance indicators of hybrid solar panels using cylindrical cogeneration photovoltaic modules. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week*. 2021. e21259624. P. 132–136. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569975>.

14. A. Szafraniec, S. Halko, O. Miroshnyk, R. Figura, A. Zharkov, O. Vershkov. Magnetic field parameters mathematical modelling of wind electric heater. *Przegląd elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97(8). P. 36-41. <https://doi.org/10.15199/48.2021.08.07>.

15. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters





for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. e 9916397. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>.

16. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Kvitka S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Energy Saving in Electromechanical Grain Cleaning Systems. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(3). P. 1418. <https://doi.org/10.3390/app12031418>.

17. Al-Issa H. A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022. Vol. 12(3). P. 2323–2334. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>.

18. Al-Quraan T. M. A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N. M., Islam K. M. A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. Vol. 7. P. 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>.

19. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology. *Appl. Sci*. 2022. Vol. 12. P. 5190. <https://doi.org/10.3390/app12105190>.

20. Karaiev O., Bondarenko L., Halko S., Miroshnyk O., Vershkov O., Karaieva T., Shchur T., Findura P., Prístavka M. Mathematical modelling of the fruit-stone culture seeds calibration process using flat sieves. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. Vol. 24(3). P. 119–123. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0020>.

*Стаття надійшла до редакції 2.04.2024 р.*

**A. Panov<sup>1</sup>, S. Hrytsenko<sup>1</sup>, S. Halko<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>State Biotechnological University,**

**<sup>3</sup>Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

**DEVELOPMENT OF A FUZZY ALGORITHM FOR REGULATING  
COEFFICIENTS OF VOLTAGE UNSYMMETRY BY REVERSE  
AND ZERO SEQUENCES**

***Summary***

The article is formulated the results of the study of the use of fuzzy control algorithms for the normalization of voltage asymmetry coefficients for reverse and zero sequences in the power grid. The problem of three-phase electrical networks with a voltage of 0.4 kV is presented. It was found that the asymmetry of the voltage is expressed in the inequality between the modules of the phase voltage vectors and the shift angles between them. It was found in the problem that voltage asymmetry leads to a sharp decrease in the efficiency of three-phase asynchronous motors. Asynchronous



motors, which constitute the largest part of the industrial loads of the system, were studied. An analysis of the latest research was carried out. The option of eliminating voltage asymmetry in rural electric networks due to the use of special devices for symmetrizing the power line is considered. Considered another option to eliminate voltage asymmetry due to equalization of the load by phases. A technical solution to this method was found in the introduction of an additional interphase variable resistance. The last considered technical solution was equalization of the load by phases with the introduction of a balancing device of the transformer type. The purpose of the study was formed to improve the quality of electricity by adjusting the voltage asymmetry coefficients in reverse and zero sequence. Modeling of the system in fuzzy logic is developed, where the input and output variable terms are presented. The graphical regulation of the rules of the input variables is presented, where the switching of the commutation is clearly visible. Heuristic knowledge of the analyzed problem area of the logical conclusion for the normalization of the voltage asymmetry coefficients in the reverse and zero sequence is presented. A fuzzy output surface view GUI for switching is demonstrated. The effectiveness of the presented algorithms is shown, taking into account modeling.

**Key words:** power quality, voltage asymmetry coefficient, uncertainty, regulation algorithm, reverse and zero sequence.