

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.14

УДК 62:681.5:004. 94

**Волошко А.В.**, д.т.н, професор, ORCID: 0000-0002-6867-2060, e-mail: avolosko820@gmail.com  
**Джеря Т.Е.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня, ORCID: 0000-0002-9519-2951,  
e-mail: tatyanakurus0202@gmail.com  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

**Voloshko Anatoly**, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Power Supply,  
**Dzheria Tetiana**, graduate student of the Department of Power Supply  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv

### МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

*В останні роки насичення електричних мереж потужними нелінійними навантаженнями, впровадження засобів перетворювальної техніки та відновлюваних джерел енергії призводять до необхідності систематичного аналізу та дослідження якості електричної енергії (ЯЕЕ). Одним із факторів, які суттєво впливають на роботу електрообладнання є короткі замикання. В статті на основі розробленої моделі формування спотворень ЯЕЕ досліджено однофазне коротке замикання в трифазній електричній мережі шляхом переходу її до однофазної системи з двома проєкціями  $\alpha$ - $\beta$  і вектором напруги нульової послідовності.*

*Дослідження впливу місця розташування точки короткого замикання на напругу в електричній мережі показали, що різниця у відстані від місця пошкодження до навантаження, типу короткого замикання призводить до різного ступеня зміни напруги. Результати моделювання та теоретичний аналіз показують, що запропонована модель та застосування методу просторового вектору добре імітують зміну напруги при короткому замиканні і можуть бути основою створення системи моніторингу ЯЕЕ в електричних мережах.*

**Ключові слова:** однофазні короткі замикання; просторовий вектор; модель формування спотворень якості електричної енергії.

*In recent years, the saturation of electric networks with powerful nonlinear loads, the introduction of conversion equipment and renewable energy sources lead to the need for systematic analysis and research of the quality of electric energy (QEE). One of the factors that significantly affect the operation of electrical equipment is short circuits. In the article, based on the developed model of the formation of QEE distortions, a single-phase short circuit in a three-phase electrical network is investigated by switching it to a single-phase system with two  $\alpha$ - $\beta$  projections and a zero-sequence voltage vector.*

*Studies of the influence of the location of the short-circuit point on the voltage in the electrical network have shown that the difference in the distance from the point of damage to the load, type of short-circuit leads to varying degrees of voltage change. The simulation results and theoretical analysis show that the proposed model and the application of the spatial vector method well simulate the voltage change during a short circuit and can be the basis for creating a QEE monitoring system in electrical networks.*

**Keywords:** single-phase short circuits; spatial vector; model of formation of distortions in the quality of electrical energy.

#### Постановка проблеми

Як слідує із наукових праць в умовах експлуатації систем електропостачання серед основних причин виникнення різного роду перехідних процесів переважають короткі замикання, які суттєво порушують нормальний режим роботи електроустановок. В електроустановках залежно від класифікаційних ознак електричних мереж (напруга, вид струму, кількість фаз чи

полюсів, стан нейтралі або середньої точки) розрізняють такі типи коротких замикань: трифазне, двофазне, двофазне заземлення, однофазне заземлення. Як показує аналіз наукових публікацій, більшість несправностей приносить у системах передачі і розподілу однофазне коротке замикання на землю. Воно призводить до коливань напруги в системах живлення, спричиняючи її падіння, переривання та її збільшення, а також призводить до збільшення струму.

#### Аналіз основних досліджень та публікацій

Існує багато методів моделювання та розрахунків коротких замикань в електричних мережах. Серед них можна відмітити наступні. В [1] представлено метод розрахунків коротких замикань шляхом заміни реальної електричної мережі однофазною шляхом створення еквівалентних двопровідних однофазних мереж, подібних до трифазних. Метод дозволяє розраховувати на однофазній двопровідній основі струм короткого замикання (стаціонарний стан) через землю на трифазній заземленій нейтралі. На основі виведення математичної моделі систем рівнянь [2], як універсального способу розробки режимів роботи системи, коли вона піддається пошкодженню під дією коротких замикань різного типу.

Для встановлення системи захисту в електричній мережі необхідно знати значення струму короткого замикання. Моделювання проводиться на платформі Matlab/Simulink [3]. В [4] представлено електричну напругу на основі мережі Петрі.

Складність даних систем та методів, використання в основному методів статистичного аналізу робить їх застосування для побудови систем моніторингу ЯЕЕ в реальному часі неефективним. У зв'язку з чим питання моделювання та ведення розрахунків параметрів перехідних процесів в електричних мережах є актуальним, особливо на етапі проектування та експлуатації систем електропостачання з метою отримання оцінок перспективних і досяжних їх характеристик.

#### Формулювання мети дослідження

На основі розробленої моделі спотворення якості електричної енергії змоделювати однофазні короткі замикання в трифазній електричній мережі та ідентифікувати їх тип шляхом аналізу кутової частоти просторового вектору.

#### Виклад основного матеріалу

Розглянемо принципову схему заземлення фази А в енергосистемі (рис. 1). Напруги лінії замикання становлять [5]:

$$U_{A-D} = 0, \quad (1)$$

$$U_{B-D} = U_B - U_A = \sqrt{3} U_A e^{-j150^\circ}, \quad (2)$$

$$U_{C-D} = U_C - U_A = \sqrt{3} U_A e^{j150^\circ}. \quad (3)$$

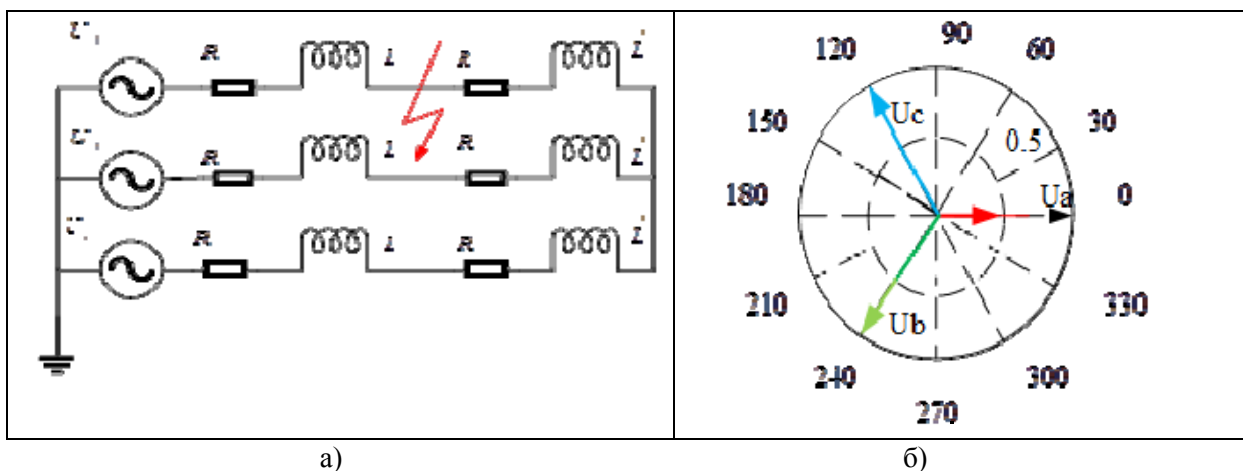


Рис. 1. Принципова схема однофазного замикання на землю — а) та його векторна діаграма — б)

Моделювання однофазного короткого замикання на землю проводилось за допомогою розробленої авторами моделі формування спотворень якості електричної енергії. Структура даної моделі побудована на основі так званої архітектури framework, яка задає структуру, визначає правила та представляє необхідний набір інструментів для створення моделі.

Для моделювання однофазного короткого замикання в основі даної моделі є синусоїди, амплітудно-модульовані різноманітними математичними функціями. В загальному вигляді маємо

$$U = A \left[ 1 - \alpha (u(t-t_1) - u(t-t_2)) \right] \sin(2\pi f_1 t + \theta), \quad (4)$$

де  $A$  — амплітуда,  $\theta$  — фаза сигналу,  $\alpha$  — величина провалу/перевищення, тривалість падіння/перевищення напруги визначається ступінчастими функціями  $u(t-t_1)$ ,  $u(t-t_2)$ ,  $t_1$  і  $t_2$  є часом початку та кінця падіння/перевищення напруги.

Подальші дослідження відповідно до рис.1, показали наступне. Коли у фазі  $A$  відбувається однофазне замикання на землю, напруга у фазі  $A$  дорівнює нулю, а напруга фаз  $B$  і  $C$  у місці замикання підвищується до початкової (рис. 2). Час моделювання вибраний  $T = 0,4$  с. Початок короткого замикання —  $t_1 = 0,11$  с, а його закінчення  $t_2 = 0,15$  с. Опір точки замикання, та точки пошкодження вибрано  $0.001$  Ом [6]. На рис. 2 представлено результати дослідження однофазного короткого замикання на землю.

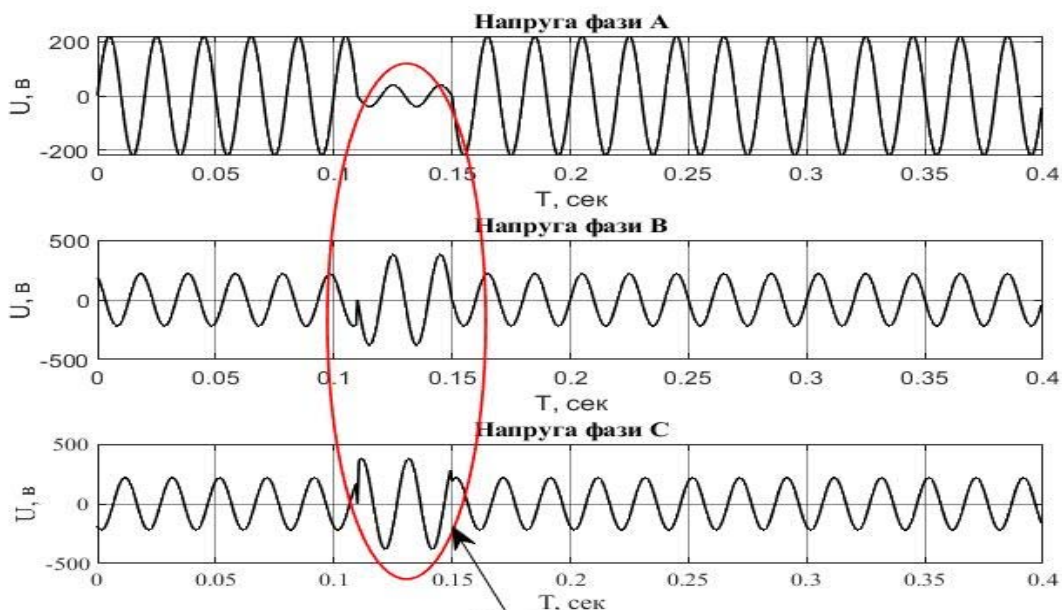


Рис. 2. Напруга на стороні живлення при однофазному замиканні на землю

Із рис. 2 слідує, що напруга фази  $A$  падає із «тремтінням», коли однофазне замикання відбувається з  $0,11$  с, напруга фаз  $B$  і  $C$  зростає. Зміна фазових струмів представлена на рис. 3.

На рис. 3 видно, що струм фази  $A$ ,  $B$ ,  $C$  дорівнює  $0$  перед однофазним замиканням, струм фази  $A$  більше не дорівнює  $0$ , коли відбувається замикання фази  $A$ , струм фази  $A$  сильно коливається за законом синусоїди і швидко падає до  $0$ .

Останнім часом широкое застосування до аналізу режимів електропостачання чи електроспоживання набули так звані методи формування просторового вектору [7]. Основна їх ідея полягає в переході трифазної симетричної системи до двофазної, або, точніше, до однофазної системи з двома проєкціями  $\alpha$ - $\beta$  для трьох основних ліній і додатково нульова складова  $0$  (її також позначають як « $\gamma$ ») для чотирьохпроводних. Як показано в [8], зв'язок між трифазною симетрич-

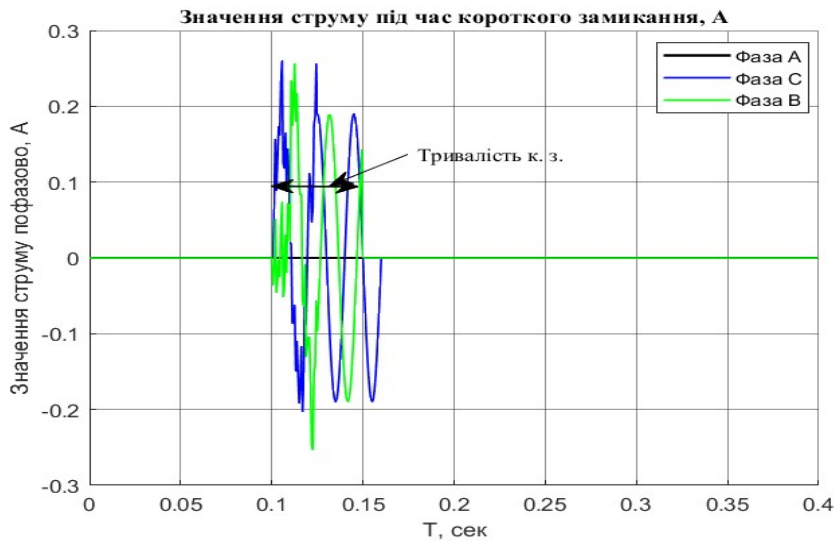


Рис. 3. Криві струму у точці однофазного замикання на землю

ною системою  $A-B-C$  і системою  $\alpha-\beta$  встановлюється за умови, що вісь  $\alpha$  розташована на векторі фази  $A$ , а вісь  $\beta$  розташована перпендикулярно до  $\alpha$ , спрямованому до вектору фази  $B$ . Тоді на основі рівнянь трифазної симетричної системи  $A-B-C$  і з урахуванням розташування векторів трифазної системи та відповідних кутів між ними та осями  $\alpha$  і  $\beta$  визначаються проекції кожного вектору на вісь і ці проекції підсумовуються з урахуванням напрямку. При цьому маємо:

$$\begin{aligned} U_{\alpha} &= \frac{2}{3} \left( 1\dot{U}_a - \frac{1}{2}\dot{U}_b - \frac{1}{2}\dot{U}_c \right); \\ U_{\beta} &= \frac{2}{3} \left( 0\dot{U}_a + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{U}_b - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{U}_c \right); \end{aligned} \quad (5)$$

У матричній формі матриця перетворення Кларка буде наступним:

$$T_{\alpha\beta 0}^{abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Тоді проекції кожного вектору в системі  $\alpha-\beta-0$  будуть мати наступний вигляд:

$$U_{\alpha\beta 0} = T_{\alpha\beta 0}^{abc} U_{abc} \rightarrow \begin{bmatrix} \dot{U}_{\alpha} \\ \dot{U}_{\beta} \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Множник в матриці взятий відповідно до [8] і використовується для збереження величин між двома системами координат.

Таким чином, три системні напруги можна представити у вигляді суми двох векторів, що обертаються протилежно з кутовою частотою [9].

$$u_A(t) = U \cos(\omega t + \varphi) = \frac{U}{2} \left( e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-j(\omega t + \varphi)} \right). \quad (8)$$

Тобто, просторовий вектор описується як сума векторів кутової частоти, які представляють собою комплексні величини.

Напруга нульової послідовності для даного типу короткого замикання представляється наступним чином:

$$u_0(t) = \frac{h}{3} \cos(\omega t + \varphi - (n-1) \frac{2\pi}{3}), \quad (9)$$

де  $n = 1, 2, 3$  — трифазна система (A, B, C),  $h$  — величина провалу напруги.

На рис. 4 відповідно до (5)—(9), представлені еквівалентні збалансовані системи електричної мережі. У трифазній збалансованій електричній мережі кут між фазовими векторами складає  $120^\circ$ , а фазовий кут між векторами просторового вектору —  $90^\circ$ .

Відповідно до рис. 2 просторовий вектор трифазної системи при однофазному короткому замиканні на землю представлено на рис. 5. Як видно із рис. 4, для збалансованої системи

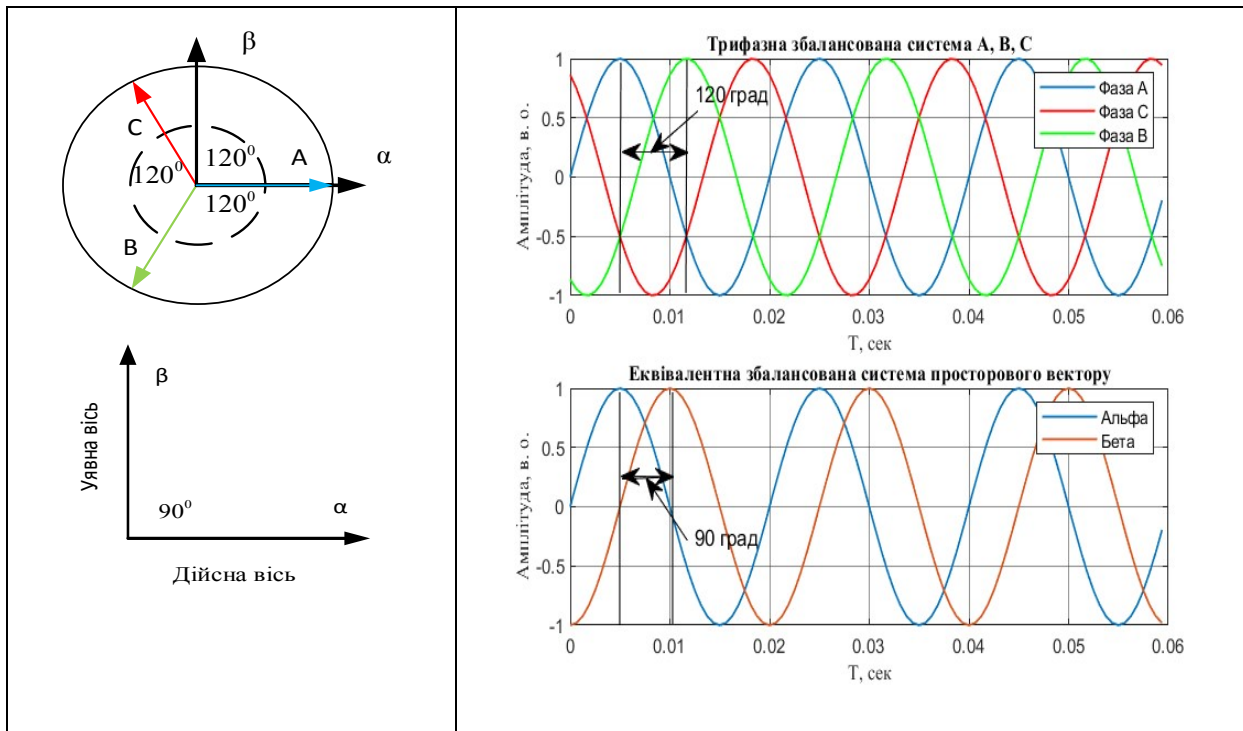


Рис. 4. Еквівалентні збалансовані системи електричної мережі та просторового вектору



Рис. 5. Формування просторового вектору симетричної трифазної системи (крива 1) та при наявності однофазного короткого замикання на землю (крива 2)

просторовий вектор складається тільки з додатного вектору кутової частоти і слідує по колу (крива 1) в комплексній площині з радіусом, який дорівнює напрузі електричної мережі. У випадку короткого замикання система стає незбалансованою і просторовий вектор є еліпсом із параметрами ( $R_{\max}$  — радіус великої осі еліпса,  $R_{\min}$  — радіус малої осі еліпса), що залежать від величини падіння напруги та зсуву фазового кута.

Дослідження властивостей просторового вектору проводилися також при наявності короткого замикання типу *B* додатково у фази *B* і *C*. На рис. 7 представлені їх відповідні просторові вектори.

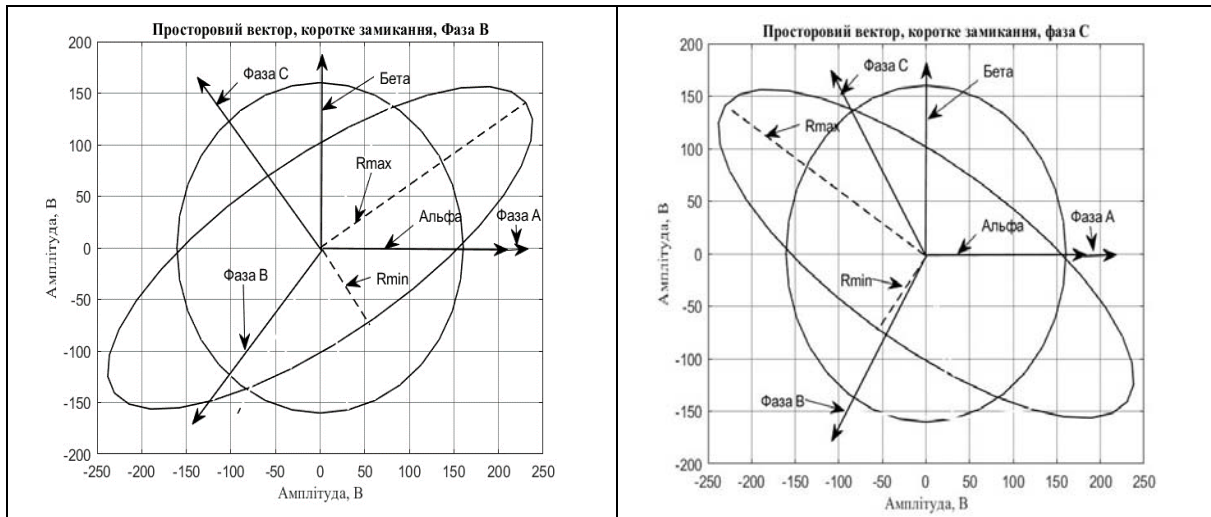


Рис. 6. Просторові вектори при короткому замиканні у фазах *B* і *C*

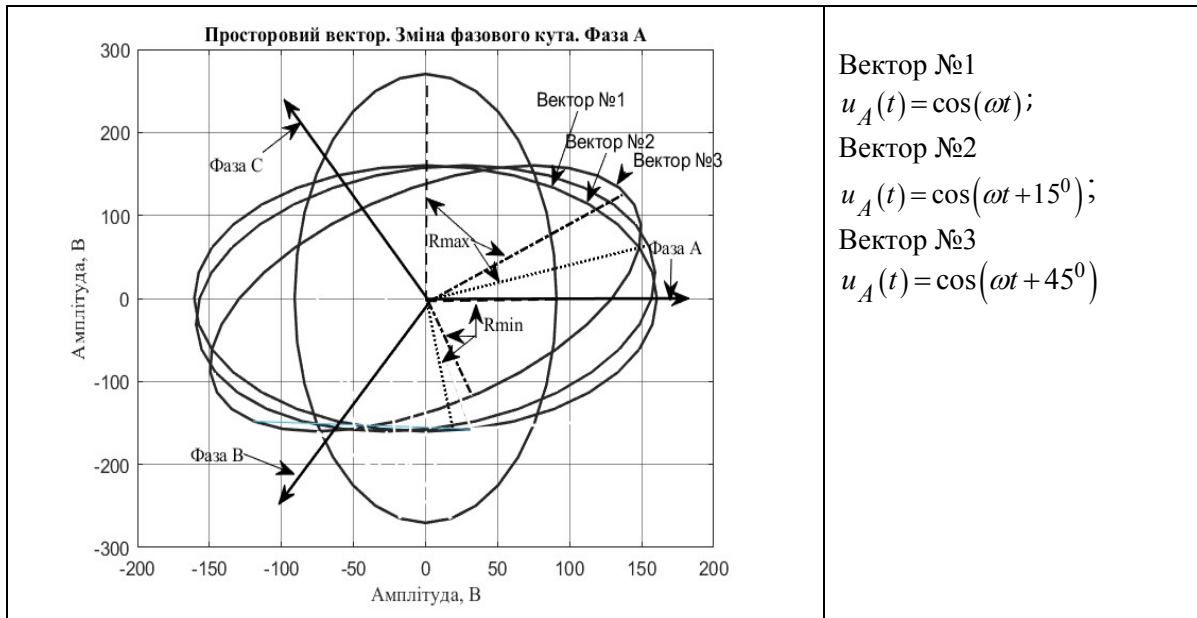


Рис. 7. Залежність просторового вектору (його  $R_{\min}$ ) від зміни фазового кута (незбалансована трифазна система)

Аналізуючи результати дослідження які представлені на рис. 5 та 6, необхідно відмітити наступне:

1. В загальному вигляді кут нахилу еліпса залежить від фази напруги, в якій відбувається коротке замикання. В загальному вигляді формула має наступний вигляд:

$$\theta = \frac{5 \cdot \pi}{6} - n \frac{\pi}{3}, \quad n=1,2,3. \quad (10)$$

2. Величина  $R_{\min}$  залежить від фазового кута напруг (рис. 7).

Подальші дослідження проводилися у плані визначення впливу місця розміщення короткого замикання на напругу в електричній мережі. Як відомо, різниця у відстані від пошкодження до навантаження (зміна параметрів лінії постачання/споживання), місця несправності та тип короткого замикання призводять до різного ступеня зміни напруги.

Розглянемо значення фазних напруг генераторів. Виміряні значення напруг фаз A, B, C до точки замикання, під час дії короткого замикання та після відновлення працездатності системи відповідно до (1)—(3) представлені на рис. 8.

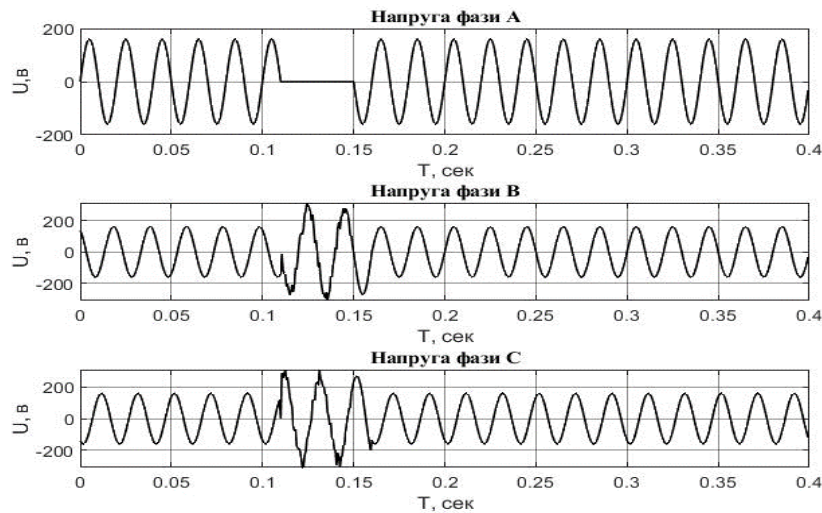


Рис. 8. Напруги трифазної системи в точці короткого замикання

Як показано на рис. 8, напруга фази A переривається, коли три генератори при короткому замиканні замикаються через 0,11 с. Напруга фази A дорівнює 0, тоді як напруга фаз B і C зростає. Напруга на землю фаз B, C до короткого замикання становить 160 В, тоді як напруга зростає до 277 В після несправності, ( $277=160 \times \sqrt{3}$ ), які підходять до формул (1)—(3). Коли дія короткого замикання закінчується (після 0,15 с), значення напруг фаз A, B, C повертаються до нормального.

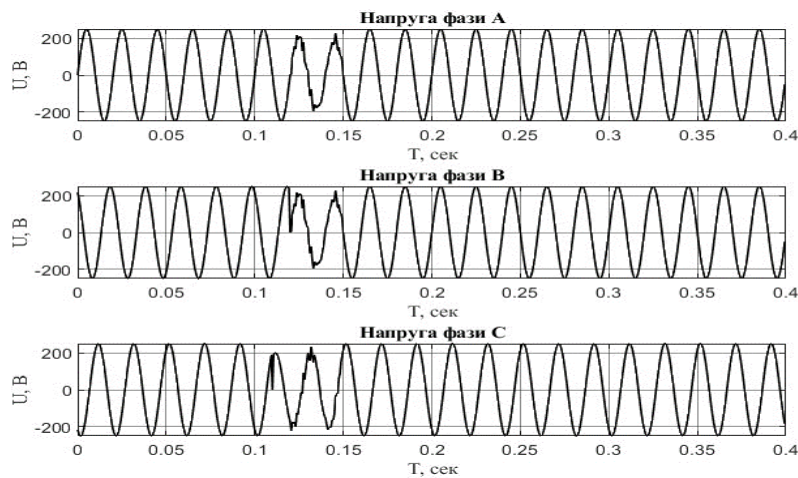


Рис. 9. Напруги трифазної системи в точці живлення у випадку трифазного короткого замикання

Досліджувався також вплив типу короткого замикання на ступень зміни напруги [6]. На рис. 9 представлена трифазна система напруг на стороні живлення. Як видно із рис. 9 напруга всіх трьох фаз просідає на величину 0.8. У порівнянні з результатами дослідження однофазного короткого замикання (рис. 2) видно, що масштаб падіння напруги при трифазному короткому замиканні менший, ніж масштаб падіння напруги при однофазному замиканні.

Як слідує із наведених результатів досліджень, в залежності від відстані місця замикання значення напруг змінюється. Проведенні дослідження показали наступне. Чим менша відстань між навантаженням і точкою короткого замикання, тим більше падає напруга у фазі *A* і тим менше зростає напруга в двох інших фазах (шкала падіння напруги з 0,46 змінилася до 0,4, а шкала підвищення напруги у фазах *B* і *C* — з 1,3 до 1,6).

#### Висновки

Проведені дослідження показали, що різний тип несправності та параметри електричної мережі в місці короткого замикання, спричиняють різні порушення електричної напруги в системі живлення. Наявність короткого замикання одного типу при різних його місцях знаходження, призводить до різного падіння та перевищення напруги. Короткочасна зміна напруги є найпоширенішими спотвореннями якості електричної напруги в електричних мережах. Результати моделювання на основі розробленої моделі, узгоджуються з теорією і достовірно імітують зміну напруги в електричній мережі.

Представлена модель може допомогти створенню основи для ідентифікації та подальших заходів контролю порушень зміни напруги.

#### Список використаної літератури

1. Shetzline R.A. Equivalent single-phase networks for calculating short-circuit currents due to grounds on three-phase star grounded systems: *Journal of the A.I.E.E.* Volume: 43 Issue: 11, 1924. p. 1014–1020.
2. Ismael K.S., Kamal S.Y. Development of the methods of calculation of the electrical installations working operation in case of quality supply disturbance. *Sulaimani Journal for Engineering Sciences* Volume 7, 2020. № 3. p. 119–131.
3. Rustemlia S., Demirb I. Analysis and simulation of single phase-to-ground short circuit fault in Van 154 kV substation: An experimental assessment journal of Science and Technology *BITLIS EREN UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY* 9, 2019. № 2. p. 76–82.
4. Zhumadirova A., Markovskiy V., Kislov A. Simulation of single-phase ground short circuit protection device: *E3S Web of Conferences* 288, 01038 SUSE, 2021. p. 1–5.
5. Zhou YS, Peng Z, Wei XY, Kuang JH. Matlab simulation on single-phase-to-earth fault of small current grounding power system. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2009. № 4. p. 50–52.
6. Wu Zhu, Wei-Ya Ma, Yuan Gui, Hua-Fu Zhang Modelling and Simulation of PQ Disturbance Based on Matlab. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2012. № 9. p. 18–24.
7. Ignatova V., Granjon P., Bacha S. Space vector method for voltage dips and swells analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009. № 4. p. 2054–2061.
8. Bialobrzheskyi O. V., Vlasenko R. V. Interrelation of a Clarke and Fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. *Науковий вісник НГУ*, 2016. № 5. С. 67–74.
9. Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. Research of single-phase faults in 6-35 KV branched overhead distribution network, 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. p. 1–4.

#### SIMULATION AND RESEARCH OF SINGLE-PHASE SHORT CIRCUITS IN THE ELECTRICAL NETWORK

##### Abstract

The purpose of this work is to model single-phase short circuits in a three-phase electrical network and identify their type by analyzing the angular frequency of the spatial vector. Recently, the



saturation of electric networks with powerful non-linear loads, the introduction of conversion equipment and renewable energy sources lead to the need for systematic analysis and research of the quality of electric energy (QEE). One of the factors that significantly affect the operation of electrical equipment is short circuits. In the article, based on the developed model of the formation of QEE distortions, a single-phase short circuit in a three-phase electrical network is investigated by switching it to a single-phase system with two  $\alpha$ - $\beta$  projections and a zero-sequence voltage vector.

Studies of the influence of the location of the short-circuit point on the voltage in the electrical network have shown that the difference in the distance from the point of damage to the load, type of short-circuit leads to varying degrees of voltage change. Conducted studies have shown that different types of malfunctions and parameters of the electrical network at the point of short circuit cause different disturbances in the electrical voltage in the power supply system. The presence of a short circuit of the same type at different locations leads to different voltage drops and overvoltages. Short-term changes in voltage are the most common distortions of the quality of electrical voltage in electrical networks. The simulation results based on the developed model are consistent with the theory and reliably simulate the change in voltage in the electrical network.

In the future, the presented model can help in creating a basis for the identification and subsequent control measures of voltage change violations.

### References

- [1] Shetzline R.A. (1924). Equivalent single-phase networks for calculating short-circuit currents due to grounds on three-phase star grounded systems: *Journal of the A.I.E.E. Volume: 43 Issue: 11*, 1014-1020.
- [2] Ismael K.S., Kamal S.Y. (2020). Development of the methods of calculation of the electrical installations working operation in case of quality supply disturbance. *Sulaimani Journal for Engineering Sciences Volume 7, 3*, 119-131.
- [3] Rustemlia S., Demirb I. (2020). Analysis and simulation of single phase-to-ground short circuit fault in Van 154 kV substation: An experimental assessment journal of Science and Technology *BITLIS EREN UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY 9, 2*, 76-82.
- [4] Zhumadirova A., Markovskiy V., Kislov A. (2021). Simulation of single-phase ground short circuit protection device: *E3S Web of Conferences 288, 01038 SUSE*, 1-5.
- [5] Zhou YS, Peng Z, Wei XY, Kuang JH. (2009). Matlab simulation on single-phase-to-earth fault of small current grounding power system. *Proceedings of the CSU-EPSCA, 4*, 50-52.
- [6] Wu Zhu, Wei-Ya Ma, Yuan Gui, Hua-Fu Zhang (2012). Modelling and Simulation of PQ Disturbance Based on Matlab. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 9*, 18-24.
- [7] Ignatova V., Granjon P., Bacha S. (2009). Space vector method for voltage dips and swells analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery, 4*, 2054-2061.
- [8] Bialobrzeskiy O.V., Vlasenko R.V. (2016). Interrelation of a Clarke and Fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. *Науковий вісник НГУ, 5*, 67-74.
- [9] Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. (2017). Research of single-phase faults in 6-35 KV branched overhead distribution network, *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 1-4.

Надійшла до редколегії 02.11.2023