

УДК 621.31

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.13

РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНИХ МИТТЄВИХ ЛІНІЙНИХ СТРУМІВ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАПРУГАХ

Р. І. ДЕМ'ЯНЕНКО

Кафедра «Автоматизації та Кібербезпеки енергосистем», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, УКРАЇНА
*e-mail: Roman.Demianenko@iee.khpi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Розглянуто проблему оптимізації роботи трифазних електричних систем з ізольованою нейтраллю, яка застосовується у метрополітенах та інших критично важливих інфраструктурних об'єктах. Проаналізовано різні аспекти несиметричних навантажень, які можуть спричинити серйозні порушення в роботі всієї електромережі, включаючи зниження її стабільності та надійності. Підтверджено, що традиційні методи аналізу часто не враховують реальні умови експлуатації, що призводить до помилок у проектуванні та експлуатації систем, акцентовано увагу на необхідності розробки нових, більш точних методів аналізу. Розглянуто підходи до моделювання несиметричних режимів у мережах з ізольованою нейтраллю та показано, як зміни у фазних струмах впливають на стабільність системи. Виявлено, що використання спеціалізованих датчиків для моніторингу струмів може значно підвищити час реагування системи на нештатні ситуації, зокрема, під час просади напруги у мережі. Особливість запропонованого методу розрахунку полягає у його здатності ідентифікувати миттєві зміни лінійних струмів дуже швидко, які відіграють ключову роль у діагностиці стану системи та виявленні потенційних збоїв у її роботі. Розглядаючи систему рівнянь струмів у вузлах, було зафіксовано значну нестабільність напруги в електричній мережі метрополітену під час несиметричному провалу напруги, що вказує на необхідність подальшого дослідження та усунення проблем для забезпечення надійності та безпеки служби метро. Результати дослідження демонструють ефективність запропонованого методу для аналізу і оптимізації роботи трифазних систем з ізольованою нейтраллю, зокрема, за допомогою визначення і коригування критичних параметрів роботи тягових підстанцій метрополітену. Запропоновані методики сприятимуть покращенню продуктивності, енергетичної ефективності та надійності електричних систем, особливо в промисловості та на масштабних інфраструктурних об'єктах, забезпечуючи стабільніше та безпечніше постачання електроенергії.

Ключові слова: електротехніка; перехідні процеси; трифазні системи; аналіз напруг; аналіз струмів; несиметрія; метрополітен.

CALCULATION OF THREE-PHASE INSTANTANEOUS LINE CURRENTS AT UNBALANCED VOLTAGES

R. DEMIANENKO

Department "Automation and Cybersecurity of Energy Systems", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute";
Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The problem of optimizing the operation of three-phase electrical systems with an isolated neutral used in subways and other critical infrastructure facilities is considered. The various aspects of asymmetric loads that can cause serious disturbances in the operation of the entire power grid, including a decrease in its stability and reliability are analyzed. It is confirmed that traditional methods of analysis often do not take into account real operating conditions, which leads to errors in the design and operation of systems, and the need to develop new, more accurate methods of analysis is emphasized. The approaches to modelling asymmetric modes in networks with an isolated neutral and shows how changes in phase currents affect the stability of the system are considered. It is found that the use of specialized sensors for monitoring currents can significantly increase the system response time to abnormal situations, in particular, during voltage sags in the network. The peculiarity of the proposed calculation method lies in its ability to identify instantaneous changes in line currents very quickly, which play a key role in diagnosing the state of the system and identifying potential failures in its operation. Considering the system of equations of currents in nodes, a significant voltage instability in the subway electrical network during an asymmetric voltage dip was recorded, which indicates the need for further research and problem solving to ensure the reliability and safety of the subway service. The results of the study demonstrate the effectiveness of the proposed method for analyzing and optimizing the operation of three-phase systems with isolated neutral, in particular, by determining and adjusting the critical parameters of the operation of metro traction substations. The methods proposed in this paper will help improve the performance, energy efficiency and reliability of electrical systems, especially in industry and large-scale infrastructure facilities, ensuring a more stable and secure supply of electricity.

Keywords: electrical engineering; transient processes; three-phase systems; voltage analysis; current analysis; asymmetry; metro.

Вступ

Розуміння та оптимізація роботи трифазних електричних систем з ізольованою нейтраллю стає

дедалі важливішим у контексті зростаючих вимог до надійності та безпеки метрополітенів і великих промислових об'єктів. Специфіка цих систем полягає в тому, що несиметричні навантаження можуть

спричинити серйозні виклики для стабільності та ефективності електропостачання. Сучасні дослідження підкреслюють недостатність традиційних методів для точного аналізу динаміки перехідних процесів, що зумовлює необхідність розробки нових підходів, які б краще відповідали реальним умовам експлуатації.

Аналіз стану питання

В даний час є проблема оптимізації роботи трифазних електричних систем з ізольованою нейтраллю в метрополітені залишається актуальною та невирішеною на належному рівні, зокрема у контексті метрополітенів та інших критично важливих інфраструктур. Особливість цих систем полягає у можливості виникнення несиметричних навантажень, які можуть спричинити серйозні порушення в роботі всієї електромережі.

Одним з фундаментальних досліджень, які аналізували динаміку перехідних процесів у трифазних системах з ізольованою нейтраллю і виявили, що традиційні методи часто не враховують реальні умови експлуатації, що призводить до помилок у проектуванні та експлуатації систем. Їх роботи підкреслюють необхідність розробки нових, більш точних методів аналізу [1].

Також варто відмітити комп'ютерні моделі, які були створені для імітації несиметричних режимів у мережах з ізольованою нейтраллю і продемонстрували, як зміни у фазних струмах впливають на стабільність системи. Вони використовували ці моделі для тестування різних стратегій управління навантаженням, що дозволяє мінімізувати ризики та підвищити надійність електропостачання [2].

Не менш важливим є дослідження, які вивчали вплив змін у лінійних струмах на працездатність високовольтних комутаційних апаратів. Їх робота показала, що застосування спеціалізованих датчиків для моніторингу струмів може значно підвищити час реагування системи на нештатні ситуації [3,4].

Загальною проблемою, яку визначили всі ці дослідження, є недостатня точність існуючих методів аналізу миттєвих значень струмів, що не дозволяє в повній мірі використовувати потенціал сучасних технологій для забезпечення стабільності електромереж. Це підкреслює необхідність подальших досліджень та розробок у цій області, які дозволять створити більш надійні та ефективні системи управління для критично важливих інфраструктур.

Мета роботи

Головна мета цього дослідження полягає у розробці та валідації методу розрахунку миттєвих лінійних струмів для трифазних мереж з ізольованою нейтраллю, який дозволить більш точно прогнозувати

та аналізувати різноманітні режими роботи електричних систем [5].

Виклад основного матеріалу та аналіз отриманих результатів

Є прості приклади несиметричних навантажень розглядаються два випадки. У першому випадку (рис.1а) аналізується ситуація, коли активний опір підключений між фазами А та В без залучення інших гілок. Це призводить до виникнення струму в фазі А, що дорівнює $\frac{u_{ab}}{r_{ab}}$, та від'ємного струму в фазі В.

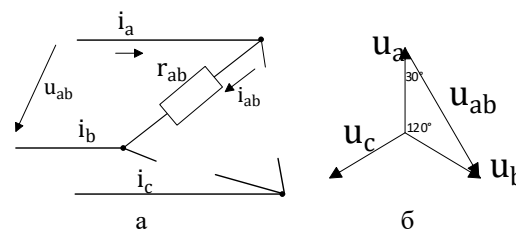


Рис. 1 – Приклад несиметричного навантаження а – електричне коло; б – векторна діаграма напруг

У синусоїдальному випадку відносно напруг u_a та u_b цей струм буде зсунутим на 150 та 30 градусів відповідно (рис. 1б), що, на перший погляд, створює ілюзію реактивного навантаження. Але навантаження є суто активним, хоча й несиметричним. Дещо поліпшити аналіз можна, якщо порахувати суму реактивних складових потужності, то вона буде дорівнювати нулю.

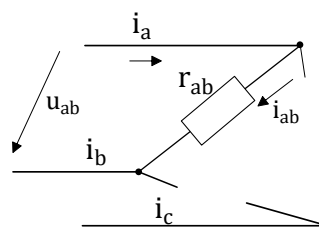


Рис. 2 – Електричне коло

У другому ж варіанті (рис. 2), як можна побачити, такий підхід також не дозволить визначити структуру навантаження.

Для розв'язання задачі аналізу несиметричних режимів у мережі з ізольованою нейтраллю пропонується використовувати систему лінійних напруг та лінійних струмів:

$$\begin{aligned} i_a + i_{ca} - i_{ab} &= 0; \\ i_b + i_{ab} - i_{bc} &= 0; \\ i_c + i_{bc} - i_{ca} &= 0; \end{aligned} \tag{1}$$

де i_a – лінійний струм фази А; i_b – лінійний струм фази В; i_{ab} – фазний струм між фазами А і В;

i_{bc} – фазний струм між фазами В і С; i_{ca} – фазний струм між фазами С і А.

Розглядаючи систему рівнянь струмів у вузлах (1), можна побачити, що її особливістю є те, що вона має нескінченну кількість рішень. Таким чином, для того, щоб отримати її необхідно доповнити ще якимось критерієм.

Миттєвий струм, що протікає через гілку ВС, позначається як i_{bc} , дорівнює різниці струму, що протікає через гілку СА, позначається як i_{ca} і струму i_c . Це можна інтерпретувати як застосування закону Кірхгофа, згідно з яким сума струмів на з'єднанні повинна дорівнювати нулю [6,7].

$$i_{bc} = i_{ca} - i_c; \quad (2)$$

$$i_{ab} = i_a + i_{ca}; \quad (3)$$

Далі визначається i_{rms} - це ефективне значення (RMS) миттєвих значень струмів у гілках АВ, ВС та СА мережі. Вона використовує квадрати значень струму для отримання загального RMS

$$i_{rms} = \sqrt{i_{ab}^2 + i_{bc}^2 + i_{ca}^2}; \quad (4)$$

Для визначення екстремуму необхідно продиференціювати ефективне значення струму відносно зміни миттєвого значення струму в вітці СА.

$$\frac{di_{rms}}{di_{ca}} = 2 * i_a - 2 * i_c + 6 * i_{ca}; \quad (5)$$

Прирівнявши отриману похідну до 0 знаходиться i_{car} , тобто значення i_{ca} , при якому i_{rms} має екстремальне значення (максимум або мінімум).

$$i_{car} = \frac{i_c - i_a}{3}; \quad (6)$$

Підставивши отримане значення у вирази (2) та (3) можна знайти i_{abr} - це значення i_{ab} , при якому i_{rms} має екстремальне значення (максимум або мінімум).

$$i_{abr} = \frac{2*i_c + i_a}{3}; \quad (7)$$

Аналогічним чином i_{bcr} - це значення i_{bc} , при якому i_{rms} має екстремальне значення (максимум або мінімум).

$$i_{bcr} = \frac{-2*i_c - i_a}{3}; \quad (8)$$

Цей метод розрахунку миттєвих лінійних струмів був застосований до реальної події, і данні котрі вдалось отримати з приладу АНТЕС2 на тяговій підстанції КП «Харківський Метрополітен».

Подія ідентифікується як провал фазної напруги, що означає короточасне зниження величини напруги нижче номінального рівня протягом 0,140 секунди, що охоплює 7 електричних

періодів. Під час цього інциденту також було виявлено відповідне падіння напруги в мережі, що вказує на падіння напруги в одній фазі у системі. Ця подія трапилась 11 серпня 2023 року о 7.00.

Крім того, запис фіксує тимчасову подію, яка може свідчити про раптовий збій в електричній мережі, що проявляється у вигляді сплеску або падіння напруги чи струму.

Зібрані дані включають комплексні вимірювання енергії з загальним енергоспоживанням, низькочастотною енергією, надлишковою енергією та нетарифною енергією, які кількісно визначаються у ват-годинах (Вт·год) і ват-секундах (Вт·с). Середня потужність, що спостерігалася під час цієї події, становила 99526,4 Вт з коливаннями від мінімуму 97204,4 Вт до максимуму 104811,0 Вт.

Показники напруги та струму демонструють значну дисперсію, із середньоквадратичною (RMS) напругою в середньому 5595,3 вольт, але знижується до мінімуму 5578,0 вольт і досягає піка 5637,8 вольт. Середньоквадратичний зареєстрований струм становив у середньому 11,21 ампера, мінімальна сила події становила 10,986 ампера, а максимальна — 11,008 ампера.

Також були зареєстровані відхилення напруги, характерні для фази, підкреслюючи, що напруга фази А впала до 2935,3 вольт, що становить 85% від номінальної напруги, і піднялася до максимуму 2968,5 вольт, або 86% від номінального значення. Фази В і С не зазнали серйозних провалів, і відхилення складають до 4%.

Лінійні значення напруги АВ впали до 5315,3 вольт, що складає 88,5% від номінальної напруги і піднялася до максимуму 5368,3 вольт, і складає 89,5% від номінального значення. А лінійне значення напруги СА впали до 5302,2 вольт, що складає 88,4% від номінальної напруги і піднялася до максимуму 5423,7 вольт, і складає 90,6% від номінального значення.

Зафіксований інцидент, свідчить про значну нестабільність напруги в електричній мережі метрополітену. Такі провали можуть мати наслідки для роботи тягової підстанції та системи метро в цілому, потенційно вказуючи на основні проблеми, які можуть вимагати подальшого дослідження та усунення для забезпечення надійності та безпеки служби метро [8,9].

На рисунку 3 представлено залежність напруги u від часу t та струму i від часу t . На першому графіку u_2 це зворотне значення напруги, а другий графік показує зворотне значення струму: i_2 .

На рис. 3(а) можна побачити зображення зворотне значення напруги u_2 , які не слідує звичному синусоїдальному патерну, але замість цього демонструють різкі зміни амплітуди, що характеризують перехідні стани в системі.

Це відображення може бути використане для аналізу стабільності системи або її реакції на виникнення нештатних ситуацій.

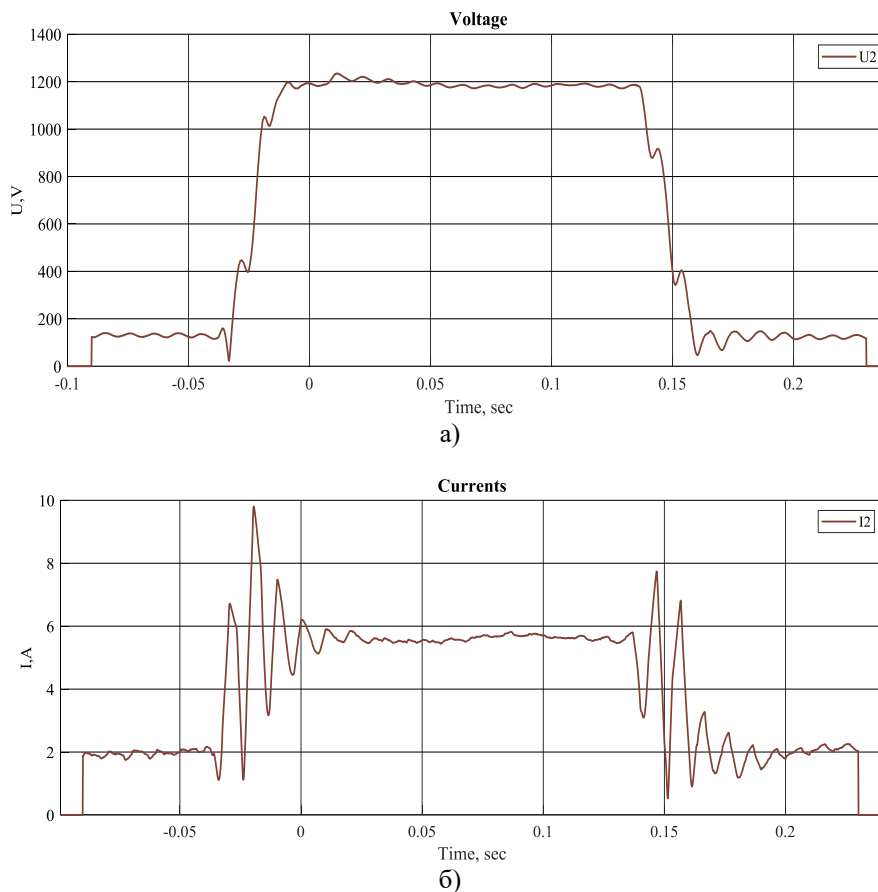


Рис. 3 – Графік зворотної послідовності значень напруги(а) та струму(б) при несиметричному провалі напруги

Після початкової фази падіння напруги u_2 , система входить у період стабілізації. Цей період може включати флуктуації або коливання значень, які з часом зменшуються, поки система не повертається до своєї нормальної робочої точки. Значення напруги на цьому етапі може бути відносно стабільним або показувати поступове зростання до нормального рівня, залежно від характеристик системи та її здатності до самовідновлення [10].

На графіку i_2 – зворотне значення струму. Подібно до графіка напруги, він також показує нестандартні зміни. Під час падіння струму i_2 можуть виникати сплески, які свідчать про швидкі зміни навантаження або реакцію захисних систем. Ці сплески можуть бути наслідком короткочасного замикання, комутаційних процесів, або інших динамічних подій в електричній системі.

Після періоду нестабільності, коли спостерігаються ці сплески, графік вказує на період, де струм i_2 стабілізується і повертається до більш регулярного та передбачуваного вигляду. Це стабілізація може вказувати на успішну роботу систем захисту, які обмежують або відключають навантаження для запобігання подальшого пошкодження обладнання, або на автоматичне регулювання системи для відновлення нормальних робочих умов [11,12].

На рис. 4 представлено залежність напруги u від часу t та струму i від часу t на основі другого методу аналізу. На першому графіку зображено миттєві лінійні напруги (u_{ab} , u_{bc} , u_{ca}), а другий графік показує миттєві значення лінійних струмів (i_{ab} , i_{bc} , i_{ca}).

На першому графіку всі три напруги коливаються синусоїдально, що є характерною ознакою змінної електричної системи. Кожна крива зміщена в часі відносно інших, що свідчить про фазовий зсув, типовий для трифазних систем. Також видно зменшення амплітудних значень.

На другому графіку, як і напруги, форма струмів для кожної фази також відповідає отриманій раніше за допомогою моделювання. Але помітна посадка окремих амплітудних значень.

На рис. 5 представлено гармонійний склад лінійних напруг та струмів, отриманих за критерієм найменшої середньоквадратичної суми квадратів лінійних струмів.

На першому графіку можна побачити гармонійний склад напруг (u_{ab} , u_{bc} , u_{ca}). Основною гармонікою є третя гармоніка, але це значення все одно має мале значення і складає 1.5%. Вищі гармоніки, які з'являються на графіку, демонструють спадання амплітуди зі збільшенням номера гармоніки, що є типовим для електричних мереж з нелінійними електроприймачами.

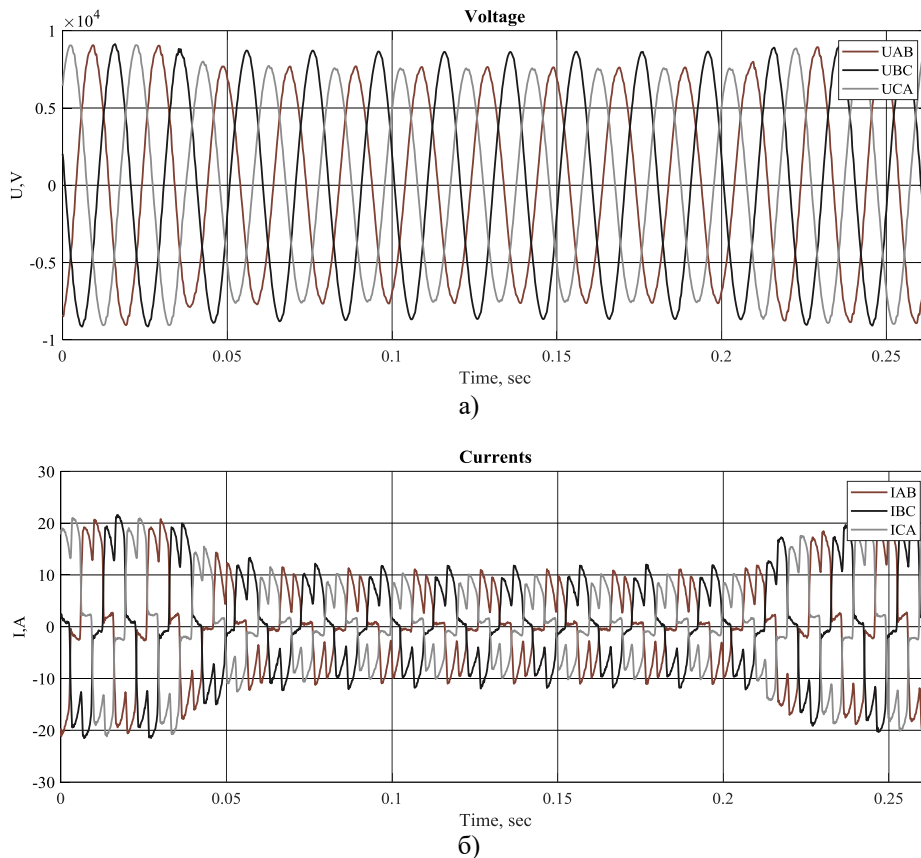


Рис. 4 – Графік лінійних напруг(а) та струмів(б) при несиметричному провалі напруги

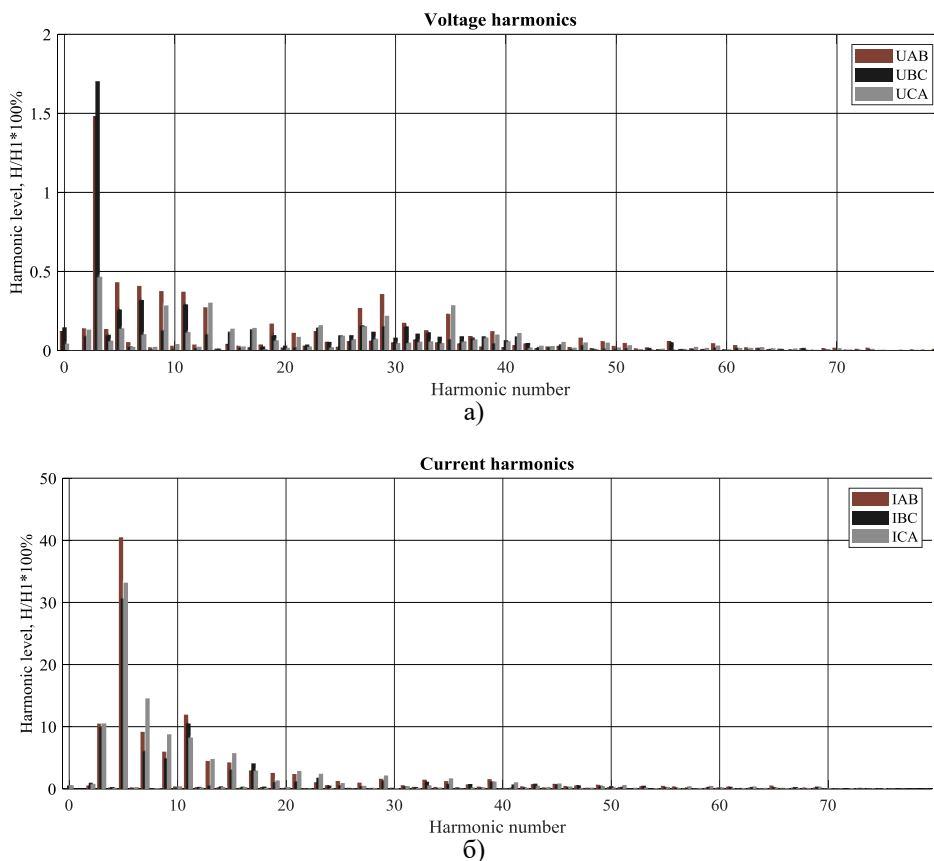


Рис. 5 – Гістограма гармонік лінійних напруг(а) та струму(б) при несиметричному провалі напруги

Другий графік показує миттєві значення лінійних струмів: i_{ab} , i_{bc} , i_{ca} . Гармоніки струму мають значно вищі рівні порівняно з гармоніками напруги, що може бути ознакою значного спотворення струму в системі. Як і випадку з графіком напруг, найбільше значення має третя гармоніка і складає 40%. Таке спотворення може викликати додаткові технічні проблеми, такі як нагрівання обладнання та зниження його тривалості служби.

На рис. 6 представлено залежність напруг u від часу t та струмів i від часу t .

На першому графіку зображено миттєві значення фазних напруг (u_a , u_b , u_c). Амплітуди цих напруг виглядають стабільними протягом більшої частини вимірювального вікна, але є невеликі, але помітні зниження амплітуди.

Другий графік показує миттєві значення фазних струмів (i_a , i_b , i_c). Також видно значне зменшення амплітуди під час посадки.

На рис. 7 представлено залежність напруг u від часу t та струмів i від часу t .

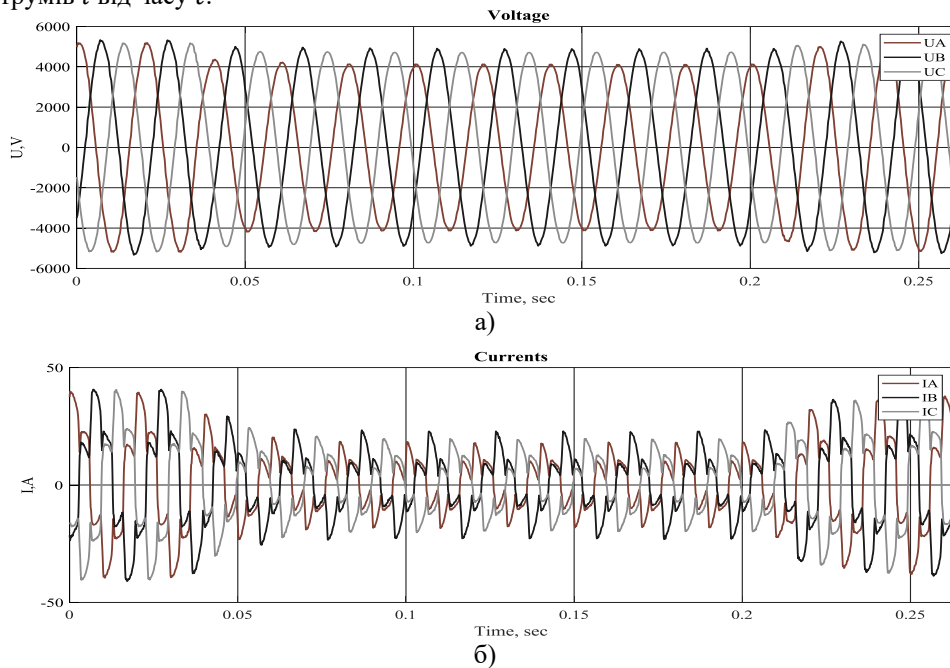


Рис. 6 – Графік фазних напруг(а) та струмів(б) при несиметричному провалі напруги.

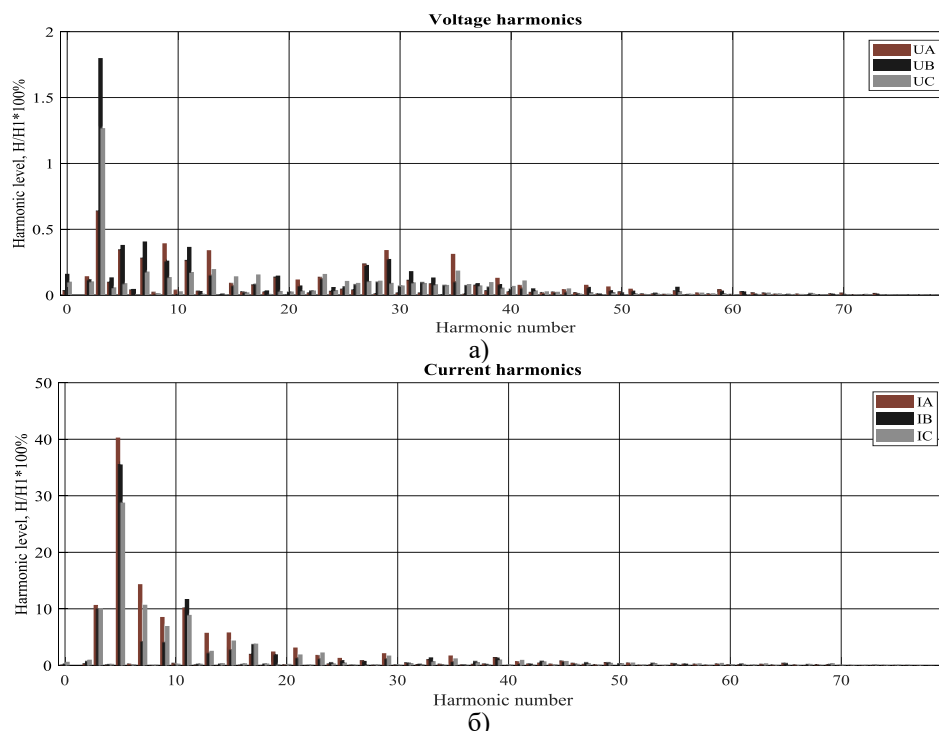


Рис. 7 – Гістограма гармонік фазних напруг(а) та струму(б) при несиметричному провалі напруги

На першому графіку зображено миттєві значення фазних напруг (u_a , u_b , u_c). Гармоніки мають такі самі значення, як і на рис. 5.

Другий графік показує миттєві значення фазних струмів (i_a , i_b , i_c). Максимальне значення має третя гармоніка і складає приблизно 40% і збігається по значенням та формі з гармоніками струму з рис. 5.

Висновки

Дослідження, представлене в цій статті, демонструє значний прогрес у розробці та аналізі методів розрахунку миттєвих лінійних струмів для систем з ізольованою нейтраллю. Застосування цих методів дозволило детально розглянути поведінку системи під час стандартних та несиметричних режимів, зокрема при відмовах окремих елементів. Виявлено, що впровадження нових методик значно підвищує точність прогнозування і аналізу системи, що сприяє своєчасному виявленню та усуненню потенційних збоїв.

Було доведено, що покращення у методах моніторингу та діагностики може забезпечити більш ефективне управління навантаженнями та зменшення ризиків, пов'язаних з несиметричними провалами напруги, що є критично важливим для безперебійної роботи метрополітенів та інших великих інфраструктурних систем. Рекомендації, наведені на основі дослідження, можуть бути використані для модернізації існуючих електричних систем, що значно підвищить їхню надійність та безпеку в експлуатації.

Таким чином, результати даного дослідження відкривають нові можливості для подальшого вдосконалення електротехнічних систем, зокрема через впровадження передових технічних рішень, що сприятимуть забезпеченню стабільності та ефективності критично важливих інфраструктур.

Список літератури

1. Lobodzinskiy V. Y. Transient analysis in three-phase cable lines with the transposition phase cables conductive screens during short circuit fault. *3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) IEEE*. 2021. № 3. P. 64-69. doi: 10.20535/1813-5420.3.2021.251207.
2. Laadjal K., Serra J., Cardoso A.J.M. Stator Faults Detection in Asymmetrical Six-Phase Induction Motor Drives with Single and Dual Isolated Neutral Point, Adopting a Model Predictive Controller. *Machines*. 2023. № 11(2). P. 132. doi: 10.3390/machines11020132.
3. Yao Y., Ouyang X., Zeng G., Tang Q., Ma W. Research on modularizing design of 10 kV switchgear with line outlet for live maintenance. *Energy Reports*. 2021. № 7. P. 10-16. doi: 10.1016/j.egy.2021.02.033.
4. Zheng W., Jia X., Zhou Z., Yang J., Wang Q. Multi-physical field coupling simulation and thermal design of 10 kV-KYN28A high-current switchgear. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023. № 43. P. 101954. doi: 10.1016/j.tsep.2023.101954.

5. Kececioglu O. F., Acikgoz H., Yildiz C., Gani A., Sekkeli M. Power Quality Improvement Using Hybrid Passive Filter Configuration for Wind Energy Systems. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017. № 12. P. 207-216. doi: 10.5370/JEET.2017.12.1.207.
6. Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Гапон Д. А., Рудевич Н. В., Дем'яненко Р. І. Зв'язок коронного розряду з якістю електроенергії. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*. 2021. № 2. С. 74-79. doi: 10.20998/2411-3441.2021.2.11.
7. Сулим А. О., Мельник О. О., Бялобржеський О. В., Ломонос А. І. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, (10 червня 2021)*. 2021. № 4. С. 118-127. doi: 10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127.
8. Бедерак Я. С., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Дем'яненко Р. І. Вплив низької якості електричної енергії на роботу електрообладнання. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2021. № 2. С. 18-24. doi: 10.20998/2224-0349.2021.02.11.
9. Michalec Ł., Jasiński M., Sikorski T., Leonowicz Z., Jasiński Ł., Suresh V. Impact of Harmonic Currents of Nonlinear Loads on Power Quality of a Low Voltage Network—Review and Case Study. *Energies*. 2021. № 14. P. 3665. doi: 10.3390/en14123665.
10. Xiao X., Xu W., Tang Y., Li W., Dong D., Shangguan Y., Huang S. Improved Loss Minimization Control Based on Time-Harmonic Equivalent Circuit for Linear Induction Motors Adopted to Linear Metro. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. № 72. P. 8601-8612. doi: 10.1109/TVT.2023.3244602.
11. Гапон Д. А., Зуєв А. О., Качанов П. О., Кубрик Б. І. Визначення джерела вищих гармонік у системах електропостачання зі змішаним навантаженням. *Сучасні інформаційні системи*. 2022. № 6. С. 55-60. doi: 10.20998/2522-9052.2022.1.09.
12. Bartolomei L., Cavaliere D., Mingotti A., Peretto L., Tinarelli R. Testing of Electrical Energy Meters Subject to Realistic Distorted Voltages and Currents. *Energies*. 2020. № 13(8). P. 2023. doi: 10.3390/en13082023.

References (transliterated)

1. Lobodzinskiy V. Y. Transient analysis in three-phase cable lines with the transposition phase cables conductive screens during short circuit fault. *3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) IEEE*, 2021, Vol. 3, pp. 64-69, doi: 10.20535/1813-5420.3.2021.251207.
2. Laadjal K., Serra J., Cardoso A.J.M. Stator Fault Detection in Asymmetrical Six-Phase Induction Motor Drives with Single and Dual Isolated Neutral Point, Adopting a Model Predictive Controller. *Machines*, 2023, Vol. 11, no. 2, pp. 132, doi: 10.3390/machines11020132.
3. Yao Y., Ouyang X., Zeng G., Tang Q., Ma W. Research on modularising design of 10 kV switchgear with line outlet for live maintenance. *Energy Reports*, 2021, Vol. 7, no. 3, pp. 10-16, doi: 10.1016/j.egy.2021.02.033.
4. Zheng W., Jia X., Zhou Z., Yang J., Wang Q. Multi-physical field coupling simulation and thermal design of 10 kV-KYN28A high-current switchgear. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, Vol. 43, pp. 101954-101954, doi: 10.1016/j.tsep.2023.101954.

- Engineering Progress*, 2023, Vol. 43, pp. 101954, doi: 10.1016/j.tsep.2023.101954.
5. Kececioğlu O. F., Acikgoz H., Yildiz C., Gani A., Sekkeli M. Power Quality Improvement Using Hybrid Passive Filter Configuration for Wind Energy Systems. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017, Vol. 12, no. 1, pp. 207-216, doi: 10.5370/JEET.2017.12.1.207.
 6. Grib O. G., Karpalyuk I. T., Gapon D. A., Rudevych N. V., Demianenko R. I. Correlation of corona discharge with the quality of electricity. *Bulletin of the National Technical University 'KhPI'. Series: Hydraulic machines and hydraulic units*, 2021, Vol. 2, pp. 74-79, doi: 10.20998/2411-3441.2021.2.11.
 7. Sulim A. O., Melnyk O. O., Bialobrzeski O. V., Lomonos A. I. Research of factors and assessment of their influence on the indicator of specific electricity consumption of rolling stock. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, (10 June 2021), 2021, Vol. 4, no. 268, pp. 118-127, doi: 10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127.
 8. Bederak Y., Gryb O., Karpaliuk I., Demianenko R., and Karpaliuk H. Influence of low quality of electric energy on the operation of electrical equipment. *Bulletin of the National Technical University 'KhPI'. Series: Energy: reliability and energy efficiency*, 2021, Vol. 2, no. 3, pp. 18-24, doi: 10.20998/2224-0349.2021.02.11.
 9. Michalec L., Jasiński M., Sikorski T., Leonowicz Z., Jasiński L., Suresh V. Impact of Harmonic Currents of Nonlinear Loads on Power Quality of a Low Voltage Network-Review and Case Study. *Energies*, 2021, Vol. 14, no. 12, pp. 3665, doi: 10.3390/en14123665.
 10. Xiao X., Xu W., Tang Y., Li W., Dong D., Shangguan Y., Huang S. Improved Loss Minimization Control Based on Time-Harmonic Equivalent Circuit for Linear Induction Motors Adopted to Linear Metro, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, Vol. 72, no. 7, pp. 8601-8612, doi: 10.1109/TVT.2023.3244602.
 11. Gapon D., Zuev A., Kachanov P., Kubrik B. Determination of the source of higher harmonics in power supply systems with a mixed load. *Modern information systems*, 2022, Vol. 6, no. 1, pp. 55-60, doi: 10.20998/2522-9052.2022.1.09.
 12. Bartolomei L., Cavaliere D., Mingotti A., Peretto L., Tinarelli R. Testing of Electrical Energy Meters Subject to Realistic Distorted Voltages and Currents. *Energies*, 2020, Vol. 13, no. 8, pp. 2023, doi: 10.3390/en13082023.

Відомості про авторів (About authors)

Дем'яненко Роман Ігорович – аспірант кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-0902-2607; e-mail: Roman.Demianenko@ieec.khpi.edu.ua

Demianenko Roman - Postgraduate student of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'; Kharkiv, Ukraine.; ORCID: 0000-0002-0902-2607; e-mail: Roman.Demianenko@ieec.khpi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Дем'яненко Р. І. Розрахунок миттєвих лінійних струмів у мережі метрополітену. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 99-106. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.13.

Please cite this article as:

Demianenko R. Calculation of instantaneous line currents in the metro network. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 99–106, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.13.

*Надійшла (received) 01.02.2024
Прийнята (accepted) 03.03.2024*