

*P. I. ДЕМ'ЯНЕНКО*

## РОЗРАХУНОК МИТТЄВИХ ЛІНІЙНИХ СТРУМІВ ТРИФАЗНОЇ МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛІО

Стаття зосереджується на вивченні методів розрахунку миттєвих лінійних струмів у трифазній мережі з ізолюованою нейтраллю, що є критично важливим для підвищення надійності, ефективності, точності моніторингу та діагностики, електричних систем. Розроблений метод, розширює можливості стандартних підходів до діагностики та аналізу, і він дозволяє більш точно аналізувати миттєві параметри в електричних мережах та виявляти неполадки у роботі високовольтних електроустановок. В рамках дослідження було використано комплексний підхід до аналізу та моделювання робочих і аварійних режимів тягової підстанції метрополітену з використанням трифазного випрямляча. Проведено детальне моделювання електроживлення та аналіз гармонічних складових лінійних струмів та напруг у високовольтній мережі. Промодельовані різноманітні сценарії роботи, включаючи нормальні та аварійні умови при відмові одного з діодів у випрямлячі. Встановлено, що гармонічний склад має значні зміни у разі відмови діода, що може використовуватися для діагностики стану обладнання. Результати можуть бути застосовані для оптимізації процесів проектування, експлуатації та технічного обслуговування в секторі міського електротранспорту та інших промислових системах, зниження ризику непередбачуваних аварій та забезпечення стабільності постачання електроенергії. Моделювання показало ефективність запропонованого методу для виявлення аварійних ситуацій та підвищення ефективності обслуговування тягових підстанцій. Запропоновані рекомендації сприятимуть підвищенню ефективності, енергоефективності та надійності електричних систем, зокрема у промисловому секторі та великих інфраструктурних проєктах, забезпечуючи більш стабільне та безпечне електропостачання.

**Ключові слова:** електротехніка, перехідні процеси, трифазні системи, аналіз напруг, аналіз струмів, несиметрія, стабільність системи.

*R. I. DEMIANENKO*

## CALCULATION OF INSTANTANEOUS LINE CURRENT OF A THREE-PHASE NETWORK WITH AN ISOLATED NEUTRAL

The article focuses on the study of methods for calculating instantaneous line currents in a three-phase network with an isolated neutral, which is critical for improving the reliability, efficiency, and accuracy of monitoring and diagnostics of electrical systems. The developed method extends the capabilities of standard approaches to diagnostics and analysis, and it allows for more accurate analysis of instantaneous parameters in electrical networks and detection of faults in the operation of high-voltage electrical installations. The study used an integrated approach to analyzing and modeling the operating and emergency modes of a subway traction substation using a three-phase rectifier. Detailed power supply modeling and analysis of the harmonic components of line currents and voltages in the high-voltage network were performed. Various operating scenarios are modeled, including normal and emergency conditions when one of the diodes in the rectifier fails. It was found that the harmonic composition has significant changes in the event of a diode failure, which can be used to diagnose the condition of the equipment. The results can be used to optimize the design, operation, and maintenance processes in the urban electric transport sector and other industrial systems, reduce the risk of unforeseen accidents, and ensure the stability of electricity supply. Modeling has shown the effectiveness of the proposed method for detecting emergencies and improving the efficiency of traction substation maintenance. The proposed recommendations will help to improve the efficiency, energy efficiency, and reliability of electrical systems, in particular in the industrial sector and large infrastructure projects, providing a more stable and secure power supply.

**Keywords:** electrical engineering, transients, three-phase systems, voltage analysis, current analysis, asymmetry, system stability.

**Аналіз стану питання.** У сучасній електроенергетиці однією з найважливіших задач є забезпечення стабільності та надійності електричних систем в умовах постійно змінюваних і часто несиметричних навантажень [1]. Такі навантаження можуть спричинити нестабільність роботи, знижувати ефективність системи і підвищувати ризик аварій. Основні проблеми, що виникають внаслідок несиметричних навантажень, включають негативний вплив на якість електроенергії, що виявляється у підвищенні рівня гармонік і спотворенні форми сигналу, що може шкодити чутливому обладнанню [2, 3]. Дослідження також зосереджуються на розробці методів для компенсації цих негативних ефектів, зокрема через застосування фільтрів та сучасних систем управління. Актуальні напрями досліджень у цій області охоплюють розробку і удосконалення математичних моделей для моделювання перехідних процесів, впровадження інтелектуальних систем управління електричними мережами, а також практичну апробацію запропонованих рішень на

реальних об'єктах [4]. Важливим є впровадження новітніх технологічних рішень для оптимізації роботи систем та підвищення їх енергоефективності [5].

**Вступ.** Стаття присвячена дослідженню впливу несиметричних навантажень на динаміку перехідних процесів у трифазних електричних системах. Значне зростання кількості потужних нелінійних споживачів в електричних мережах зумовлює актуальність аналізу перехідних процесів та впливу несиметричних навантажень на якість електроенергії.

**Мета статті.** Метою даної роботи є аналіз перехідних процесів в електричних системах при різних режимах несиметричних навантажень, виявлення залежностей між параметрами системи та якістю електроенергії.

**Основна частина.** Є прості приклади несиметричних навантажень, розглянемо два випадки. У першому випадку (рис. 1 а) 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 [6].

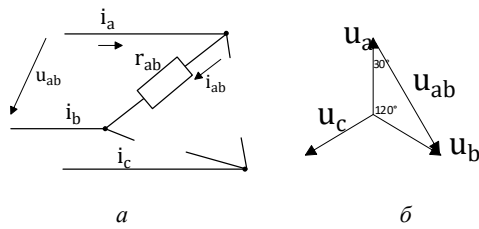


Рисунок 1 – Приклад несиметричного навантаження:  
 а – електричне коло;  
 б – векторна діаграма напруг

У синусоїдальному випадку відносно напруг  $u_a$  та  $u_b$  цей струм буде зсунутим на  $150^\circ$  та  $30^\circ$  відповідно (рис. 1 б), 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.

У другому ж варіанті (рис. 2), як можна побачити, такий підхід також не дозволить визначити структуру навантаження [7].

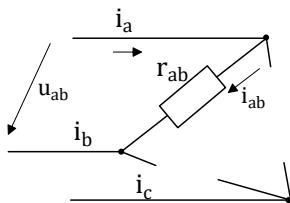


Рисунок 2 – Електричне коло

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

$$\begin{cases} i_a + i_{ca} - i_{ab} = 0; \\ i_b + i_{ab} - i_{bc} = 0; \\ i_c + i_{bc} - i_{ca} = 0; \end{cases} \quad (1)$$

- 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.

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

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

Загальна миттєва потужність є сумою добутків сили миттєвих струму і напруги в кожній гілці:  $ab, bc$  і  $ca$ .

$$p = i_{ab} \cdot u_{ab} + i_{bc} \cdot u_{bc} + i_{ca} \cdot u_{ca}; \quad (4)$$

$$p = u_{ab} \cdot (i_a + i_{ca}) + i_{ca} \cdot u_{ca} - u_{bc} \cdot (i_c - i_{ca}). \quad (5)$$

Вираз (6) дозволяє обчислити середньоквадратичну (RMS) миттєву напругу, з трьох гілок. Середньоквадратична напруга є фізичною мірою величини змінної напруги. Це особливо корисно в ситуаціях, коли напруга має різні форми та амплітуди хвилі. Це дає еквівалентний рівень напруги постійного струму, який забезпечував би ту саму середню потужність до навантаження.

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2}{3}}. \quad (6)$$

Аналогічним чином обчислюється середньоквадратичний (RMS) миттєвий струм, з трьох гілок. Середньоквадратичний струм є статистичною мірою величини змінної струму. Це особливо корисно в ситуаціях, коли струм має різні форми та амплітуди хвилі. Це дає еквівалентний рівень напруги постійного струму, який забезпечував би ту саму середню потужність до навантаження.

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{i_{ab}^2 + i_{bc}^2 + i_{ca}^2}{3}}; \quad (7)$$

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{(i_a + i_{ca})^2 + i_{ca}^2 + (i_c - i_{ca})^2}{3}}. \quad (8)$$

Коефіцієнт потужності – це безрозмірне число від  $-1$  до  $1$ . Це важливий параметр у системах живлення, який показує, наскільки ефективно електроенергія перетворюється на корисну роботу. Коефіцієнт потужності  $1$  означає, що вся потужність використовується ефективно, тоді як значення нижче  $1$  вказують на те, що деяка кількість енергії не використовується.

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2}{3}}; \\ b &= \sqrt{\frac{(i_a + i_{ca})^2 + i_{ca}^2 + (i_c - i_{ca})^2}{3}}; \\ pf &= \frac{p}{u_{rms} \cdot i_{rms}}; \\ pf &= \frac{u_{ab} \cdot (i_a + i_{ca}) + i_{ca} \cdot u_{ca} - u_{bc} \cdot (i_c - i_{ca})}{a \cdot b}. \end{aligned} \quad (9)$$

Далі необхідно виразити похідну від коефіцієнта потужності. Виявлення коренів, де ця похідна дорівнює нулю, дозволяє визначити точки екстремумів.

$$\begin{aligned}
 p_2 &= \frac{dpf}{di_{ca}}; \\
 a &= \sqrt{\frac{u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2}{3}}; \\
 b &= \sqrt{\frac{(i_a + i_{ca})^2 + i_{ca}^2 + (i_c - i_{ca})^2}{3}}; \\
 c &= u_{ab} \cdot (i_a + i_{ca}) + i_{ca} \cdot u_{ca} - u_{bc} \cdot (i_c - i_{ca}); \\
 d &= \frac{2i_a - 2i_c}{3} + 2i_{ca}; \\
 e &= \frac{(i_a + i_{ca})^2 + i_{ca}^2 + (i_c - i_{ca})^2}{3}; \\
 p_2 &= \frac{u_{ab} + u_{bc} + u_{ca}}{a * b - c \cdot \frac{d}{2(e*a)}}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Останній крок включає знаходження значення  $i_{ca}$ , для якого похідна коефіцієнта потужності дорівнює нулю.  $i_{car}$  – це значення  $i_{ca}$ , при якому  $p_2$  має екстремальне значення (максимум або мінімум).

$$\begin{aligned}
 a &= 2i_a u_{ab} - i_a u_{bc} - i_a u_{ca} + \\
 &+ i_c u_{ab} - 2i_c u_{bc} + i_c u_{ca}; \\
 i_{car} &= \frac{i_a^2 \cdot u_{bc} + i_a^2 \cdot u_{ca} + i_c^2 \cdot u_{ab} + \\
 &+ i_c^2 \cdot u_{ca} + i_a i_c \cdot u_{ab} + i_a i_c \cdot u_{bc}}{a}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Аналогічно із виразів (2) і (3)  $i_{abr}$  та  $i_{bcr}$  – це значення  $i_{ab}$  та  $i_{bc}$  відповідно, при яких  $p_2$  має екстремальне значення (максимум або мінімум).

$$i_{abr} = \frac{2i_a^2 \cdot u_{ab} + i_c^2 \cdot u_{ab} + i_c^2 \cdot u_{ca} + 2i_a i_c \cdot u_{ab} - i_a i_c \cdot u_{bc} + i_a i_c \cdot u_{ca}}{a}. \quad (12)$$

$$i_{bcr} = \frac{i_a^2 \cdot u_{bc} + i_a^2 \cdot u_{ca} + 2i_c^2 \cdot u_{bc} - 2i_a i_c \cdot u_{ab} - i_a i_c \cdot u_{bc} + i_a i_c \cdot u_{ca}}{a}. \quad (13)$$

Слід зазначити, що у трифазній мережі

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{ca} = 0. \quad (14)$$

Звідки можна записати

$$u_{bc} = -u_{ab} - u_{ca}. \quad (15)$$

Якщо підставити отримане у вирази (13–15):

$$i_{car} = \frac{n_{car}}{d_{car}}; \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 n_{car} &= i_a^2 \cdot (-u_{ab} - u_{ca}) + i_a^2 \cdot u_{ca} + \\
 &+ i_c^2 \cdot u_{ab} + i_c^2 \cdot u_{ca} + i_a i_c \cdot u_{ab} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ i_a i_c \cdot (-u_{ab} - u_{ca}) = \\
 &= u_{ab} (i_c^2 - i_a^2) + i_c^2 \cdot u_{ca} - i_a i_c u_{ca}; \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_{car} &= 2i_a u_{ab} - i_a (-u_{ab} - u_{ca}) - \\
 &- i_a u_{ca} + i_c u_{ab} - 2i_c (-u_{ab} - u_{ca}) + \\
 &+ i_c u_{ca} = 2i_a u_{ab} + i_a u_{ab} + i_a u_{ca} - \\
 &- i_a u_{ca} + i_c u_{ab} + 2i_c u_{ab} + 2i_c u_{ca} + \\
 &+ i_c u_{ca} = 3i_a u_{ab} + 3i_c u_{ab} + 3i_c u_{ca} \quad (18)
 \end{aligned}$$

вираз (11) скоротиться до

$$i_{car} = \frac{i_c - i_a}{3}. \quad (19)$$

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).

$$i_{abr} = \frac{2 \cdot i_c + i_a}{3}. \quad (20)$$

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

$$i_{bcr} = \frac{-2 \cdot i_c - i_a}{3}. \quad (21)$$

Результати чисельного моделювання. Модель було побудовано на основі схеми живлення розподільної установки (РУ) 825 В метрополітену. Модель складається з лінії, трансформатора та випрямляча. Випрямляч представляє собою трифазну шестипульсну схему Ларіонова [8].

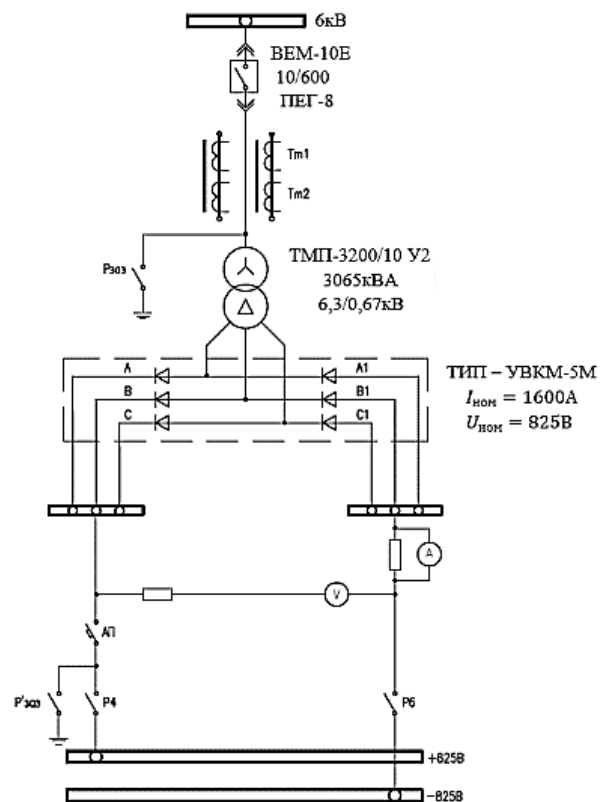


Рисунок 3 – Однолінійна схема живлення РУ 825В

Використовуючи розрахунки, що були отримані раніше, отримуємо миттєві значення напруги та струму в нормальному режимі роботи, і напругу, струму та гістограми гармонік при відмові одного із діодів у випрямлячі.

Спочатку були отримані графіки лінійних напруг та струмів у нормальному режимі роботи.

На рис. 4 представлено залежність напруги  $u$  від часу  $t$ ,  $u_{ab}$ ,  $u_{bc}$ ,  $u_{ca}$  це миттєві значення лінійних напруг. На графіку видно, що всі три криві мають синусоїдальний характер. Також можна зазначити, що фазні напруги відстають одна від одної на  $120^\circ$ , що є характерною особливістю для нормального режиму роботи трифазних систем [9].

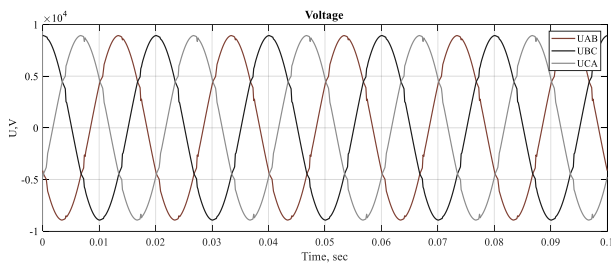


Рисунок 4 – Графік лінійної напруги при нормальних умовах роботи

На рисунку 5 демонструється залежність струму  $i$  від часу  $t$ . Ці графіки відображають динаміку зміни струму в трифазній системі.

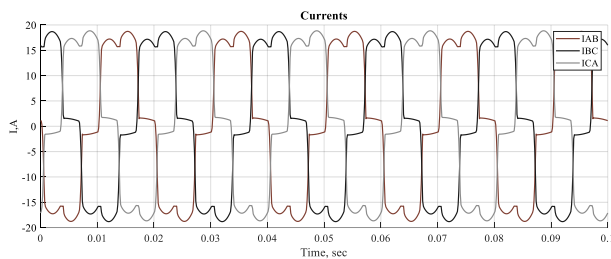


Рисунок 5 – Графік лінійного струму при нормальних умовах роботи

Графік показує миттєві значення лінійних струмів:  $i_{ab}$ ,  $i_{bc}$ ,  $i_{ca}$ . Як видно, струми мають характерний пульсуючий характер, і прямокутну форму.

Змоделюємо ситуацію, режим роботи тягової підстанції з відмовою одного діода у випрямлячі (рис. 6).

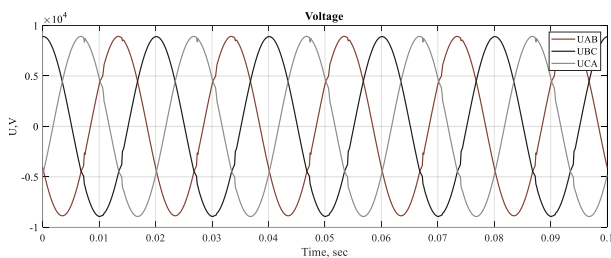


Рисунок 6 – Графік лінійної напруги при відмові одного діода

Як видно з графіку на рис. 6, напруга має синусоїдальний характер і величина лінійних напруг не

змінилась з відмовою діода, графік на рис. 6 ідентичний графіку на рис. 4.

Рис. 7 показує миттєві значення лінійних струмів:  $i_{ab}$ ,  $i_{bc}$ ,  $i_{ca}$ , які мають вони прямокутну форму, як і при нормальному режимі роботи на рис. 5. Але, у цьому випадку значення  $i_{bc}$  має однополярну форму, що значно легше інтерпретувати, як відмову відповідного діода.

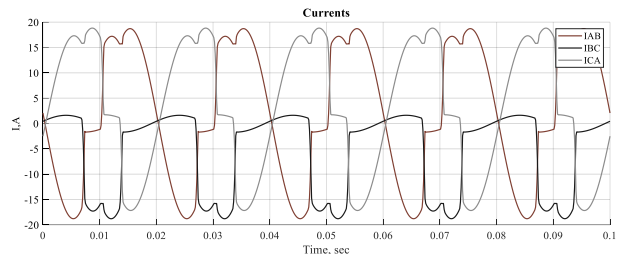


Рисунок 7 – Графік лінійного струму при відмові одного діода

Також було отримано гістограму гармонік напруг та струмів. На рис. 8 представлені гармонічні складові лінійних напруг та струмів, аналізовані згідно з розрахунку приведеного раніше. Гістограма відображає відсоткове співвідношення кожної гармоніки відносно основної частоти. Великі значення деяких гармонік вказують на значні спотворення форми напруги, або струму, які можуть виникати внаслідок нелінійних процесів, наприклад, через несиметричне випрямлення струму [10, 11]. З наведених графіків можна зробити такі висновки.

Аналізуючи графік гармонік напруги (рис. 8 а) можна зробити висновок, що вони мають невисоке значення і не перевищує 0,6 %, тому ними можна знехтувати.

Аналізуючи графік гармонік струму (рис. 8 а) можна зробити висновки:

- графік демонструє нерівномірний розподіл гармонік.
- максимальне значення має нульова гармоніка (постійна складова) і воно становить приблизно 110 %.
- гармоніки струму можуть збільшувати втрати в таких елементах, як обмотки трансформаторів та двигуни, спричиняючи їх перегрів та зниження ефективності.

- на графіку переважають парні гармоніки.

Загальний висновки стосовно обох графіків:

- наявність численних гармонік може свідчити про асиметричні умови роботи системи, які можуть виникати через технічні несправності, такі як відмова діодів.

- гармонійні спотворення мають значний вплив на якість електроенергії, що може створювати труднощі для кінцевих споживачів, особливо для тих, хто вразливий до якості електропостачання.

- виділені дані підкреслюють необхідність регулярного моніторингу гармонічних спотворень для своєчасного виявлення та усунення проблем у системі випрямлення, а також для запобігання негативним наслідкам для суміжних систем.

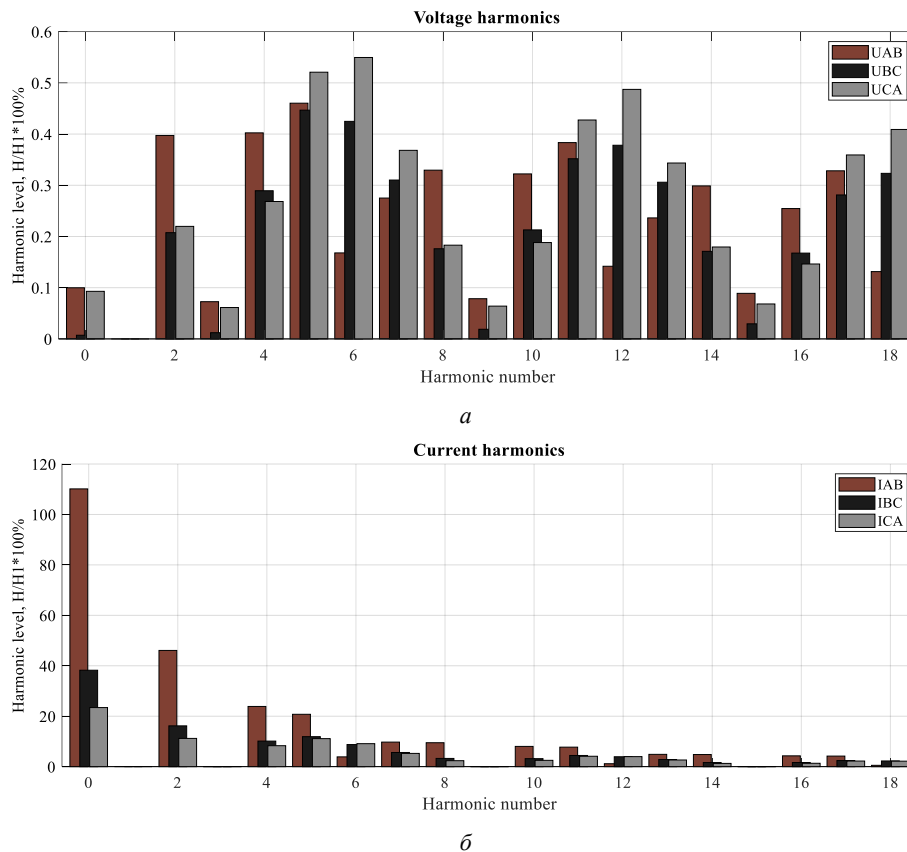


Рисунок 8 – Гістограма гармонік лінійних напруг (а) та струмів (б) при аварійному режимі роботи (відмова діода в одній фазі)

**Висновки.** В рамках проведеного дослідження було детально проаналізовано вплив несиметричних навантажень на трифазних електричних систем. Використовуючи критерій чисельного аналізу запропонований у статті, було виявлено критичні зміни в параметрах системи, які значно впливають на стабільність та якість електроенергії. Результати досліджень підкреслюють важливість постійного моніторингу та адаптації системи до змінних умов експлуатації для забезпечення її надійності.

1. Динаміка перехідних процесів: Несиметричні навантаження викликають значні перехідні процеси, що можуть спричинити нестабільність роботи системи та зниження її ефективності.

2. Вплив на якість електроенергії: Вивчення гармонік напруги та струму вказало на значні спотворення, що негативно впливають на якість електроенергії. Підвищення рівня гармонік може шкодити чутливому обладнанню, що потребує стабільного електропостачання.

3. Технічні несправності та їх наслідки: Наявність високих гармонік та несиметрія в роботі системи часто є індикатором технічних несправностей, таких як відмова діодів випрямлячів, що може призвести до подальших збоїв у системі.

4. Значення моніторингу: Постійний моніторинг та аналіз стану системи дозволяє своєчасно виявляти та усувати проблеми, що виникають внаслідок несиметричних навантажень. Розробка і

впровадження комплексних заходів, таких як фільтри для гармонік, є критично важливими для підтримки високого рівня системної надійності.

Ці висновки підкреслюють необхідність інтеграції теоретичних досліджень і практичних заходів для підвищення ефективності та надійності сучасних електроенергетичних систем в умовах постійно змінюваних навантажень.

### Список літератури

- Гапон Д. А. Методи та засоби аналізу якості електропостачання та електромагнітної сумісності електротехнічних комплексів та систем : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03. Харків, 2020. 332 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9383ad8f-8095-40eb-9c77-039f138b08e1>.
- Бедерак Я. С., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Дем'яненко Р. І., Карпалюк Г. І. Вплив низької якості електричної енергії на роботу електрообладнання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність.* 2021. № 2 (3). С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.11>.
- 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 «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати.* 2021. № 2. С. 74–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2021.2.11>.
- 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 / А. О. Сулим та ін. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* 2021. № 4(268). С. 118–127. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127>.
- Сулим А., Хозя П. Концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з накопичувачами енергії. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні*

- системи і технології». 2021. № 38. С. 63–79. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-63-6>.
6. Далека В. Х., Шкрятко А. В., Козлова О. С. Методи підвищення ефективності систем електропостачання на міському електричному транспорті. *Електрифікація транспорту*. 2018. № 15. С. 84–90.
  7. Доманський І. В., Козлова О. С. Перспективи розвитку електричних мереж зовнішнього електропостачання тягових підстанцій. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». Серія: технічні науки та архітектура*. 2018. Т. 1, № 154. С. 8–15.
  8. Mensah-Darkwa K., Zequine C., Kahol P., Gupta R. Supercapacitor Energy Storage Device Using Biowastes: A Sustainable Approach to Green Energy. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, no. 2. 414. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414>.
  9. Khodaparastan M., Mohamed A. A., Brandauer W. Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 20, no. 8. P. 2831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2886809>.
  10. Babak V. P., Babak S. V., Myslovych M. V., Zaporozhets A. O., Zvaritch V. M. Methods and Models for Information Data Analysis. *Diagnostic Systems For Energy Equipments*. Cham, 2020. P. 23–70. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2).
  11. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatina V. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6, no. 3 (102). P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>.
- quality”, *Bulletin of the National Technical University “KPI”. Series: Hydraulic Machines and Hydraulic Units*, no. 2, pp. 74–79, 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2021.2.11>. (in Ukrainian)
4. A. O. Sulym, O. O. Melnyk, O. V. Bialobrzhyskyi, and A. I. Lomonos, “Investigation of factors and evaluation of the level of their influence on the indicate of specific electricity consumption of rolling stock”, *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, no. 4(268), pp. 118–127, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127>. (in Ukrainian)
  5. A. Sulym and P. Khozia, “Management strategies for energy processes in electric rolling stock with on-board energy storage devices”, *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series “Transport Systems and Technologies”*, no. 38, pp. 63–79, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-63-6>. (in Ukrainian)
  6. V. Kh. Daleka, A. V. Shkriabko, and O. S. Kozlova, “Improving methods the power supply systems efficiency on municipal electric transport”, *Electrification of Transport*, no. 15, pp. 84–90, 2018. (in Ukrainian)
  7. I. Domanskyi and O. Kozlova, “Development prospects of external power supply electrical networks of traction substations”, *Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture*, vol. 1, no. 154, pp. 8–15, 2018. (in Ukrainian)
  8. K. Mensah-Darkwa, C. Zequine, P. Kahol, and R. Gupta, “Supercapacitor energy storage device using biowastes: A sustainable approach to green energy”, *Sustainability*, vol. 11, no. 2, Jan. 2019, Art. no. 414, doi: <https://doi.org/10.3390/su11020414>.
  9. M. Khodaparastan, A. A. Mohamed, and W. Brandauer, “Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 8, pp. 2831–2847, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2886809>.
  10. V. P. Babak, S. V. Babak, M. V. Myslovych, A. O. Zaporozhets, and V. M. Zvaritch, “Methods and models for information data analysis”, in *Diagnostic Systems for Energy Equipments*. Cham: Springer Int. Publishing, 2020, pp. 23–70, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2).
  11. A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, O. Palant, and V. Stamatina, “Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 3 (102), pp. 28–38, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>.

Надійшла (received) 26.05.2022

## References

1. D. A. Hapon, “Methods and means of power supply quality analysis and electromagnetic compatibility of electrical complexes and systems”, dissertation of Doctor of Technical Sciences, Nat. Tech. Univ. “Kharkiv Polytech. Inst.,” Kharkiv, 2020. [Online]. Available: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9383ad8f-8095-40eb-9c77-039f138b08e1>. (in Ukrainian)
2. Ya. Bederak, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko, and H. Karpaliuk, “Effect of low quality of electric power on the operation of electric power supply”, *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2 (3), pp. 18–24, 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.11>. (in Ukrainian)
3. O. Hryb, I. Karpaliuk, D. Gapon, N. Rudevich, and R. Demianenko, “Relations between the coronal discharge and the electricity

## Відомості про авторів / About the Authors

**Дем’яненко Роман Ігорович (Roman Demianenko)** – аспірант кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0902-2607>; e-mail: [Roman.Demianenko@iee.khpi.edu.ua](mailto:Roman.Demianenko@iee.khpi.edu.ua).