

Р. І. ДЕМ'ЯНЕНКО, А. О. СОЛОДОВНИК, Д. С. МАЦУГИРЯ, О. О. СВЕТЕЛІК

ДІАГНОСТИКА ВІДМОВ ТРИФАЗНОГО ВИПРЯМЛЯЧА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Розглянуто аналіз несиметричних режимів електричних мереж із ізольованою нейтраллю. Проаналізовано окремий випадок несиметричного навантаження, що впливає на розподіл струмів у фазах. Показано, що у випадку активного опору, підключеного між фазами без залучення інших гілок, виникають струми зі зсувом фазних кутів, що створює ілюзію реактивного навантаження. Проте доведено, що навантаження залишається суто активним. Запропоновано методику аналізу за допомогою системи лінійних напруг та струмів, що дозволяє розширити підходи до оцінки несиметричних режимів. Розглянуто застосування методу розрахунку лінійних струмів за критерієм найменшої суми квадратів лінійних потужностей для електроенергетичних мереж метрополітену. Акцентовано увагу на моделюванні підсистеми, що містить лінію передачі, трансформатор та випрямляч. Підтверджено, що відмова одного з діодів у шестимостовому випрямлячі суттєво впливає на функціональність системи, викликаючи спотворення струму. Проаналізовано характерні різні види відмов діодів. Встановлено, що ці відмови призводять до зміни форми струму, що підтверджено графіками при аварійних режимах роботи. Досліджено гармонійний склад лінійних напруг та струмів, що виявив значні значення гармонік струму, а гармоніки напруги мають невелике значення. Виявлено асиметрію роботи випрямляча при несправностях, що призводить до підвищення гармонічних спотворень та зниження якості електроенергії. Такі явища можуть спричиняти додаткові втрати в системі та негативно впливати на стабільність роботи електрообладнання. Отримані результати дослідження можуть слугувати основою для розробки нових методів контролю та покращення характеристик електроенергетичних систем, що є важливим завданням для подальших досліджень у цій сфері. Результати дослідження демонструють необхідність врахування гармонійного аналізу для оцінки стану електричних мереж. Отримані дані можуть бути використані для вдосконалення методик діагностики несправностей випрямлячів та підвищення надійності роботи електроенергетичних систем.

Ключові слова: несиметричне навантаження, лінійний струм, випрямляч, електрична мережа, гармонійний аналіз, якість електричної енергії, аварійні режими.

R. DEMIANENKO, A. SOLODOVNYK, D. MATSUGYRIA, O. SVETELIK

DIAGNOSIS OF FAULTS IN A THREE-PHASE RECTIFIER BASED ON POWER QUALITY ANALYSIS

The paper deals with the analysis of asymmetric modes of electric networks with an isolated neutral. A single case of asymmetric loading affecting the distribution of currents in phases is analysed. It is shown that in the case of an active resistance connected between the phases without involving other branches, currents with a shift in phase angles occur, which creates the illusion of a reactive load. However, it is proved that the load remains purely active. A method of analysis using a system of linear voltages and currents is proposed, which allows expanding approaches to the assessment of asymmetric modes. The application of the method of calculating linear currents according to the criterion of the least sum of squares of linear capacities for subway power networks is considered. Attention is focused on modelling a subsystem containing a transmission line, a transformer and a rectifier. It is confirmed that the failure of one of the diodes in a six-bridge rectifier significantly affects the functionality of the system, causing current distortion. Various types of diode failures are analysed. It is established that these failures lead to a change in the current waveform, which is confirmed by graphs under emergency modes of operation. The harmonic composition of line voltages and currents was studied, which revealed significant values of current harmonics, while voltage harmonics are of little importance. The asymmetry of the rectifier's operation in case of faults is revealed, which leads to an increase in harmonic distortion and a decrease in the quality of electricity. Such phenomena can cause additional losses in the system and negatively affect the stability of electrical equipment. The obtained results of the study can serve as a basis for the development of new methods for monitoring and improving the characteristics of electric power systems, which is an important task for further research in this area. The results of the study demonstrate the need to take into account harmonic analysis to assess the state of electrical networks. The data obtained can be used to improve the methods of rectifier fault diagnostics and increase the reliability of electric power systems.

Keywords: asymmetric load, linear current, rectifier, electric network, harmonic analysis, quality of electricity, emergency modes.

Вступ. У сучасних електроенергетичних системах якість електроенергії є критично важливим фактором, що впливає на стабільність роботи обладнання та ефективність енергоспоживання. Одним із ключових компонентів у таких системах є трифазні випрямлячі, які широко використовуються у промислових і транспортних електричних установках. Відмови цих пристроїв можуть призводити до погіршення якості електроенергії, зниження ефективності роботи системи та навіть до серйозних аварійних ситуацій.

Виявлення та діагностика відмов трифазних випрямлячів є важливим завданням для забезпечення надійності електроенергетичних мереж. Одним із перспективних підходів є аналіз показників якості електроенергії, що дозволяє виявляти відмови без необхідності фізичного втручання в роботу системи [1].

Мета роботи. Метою даного дослідження є розробка методики виявлення відмов трифазного випрямляча шляхом аналізу показників якості електроенергії, що дозволить підвищити надійність та ефективність роботи електроенергетичних систем. У межах цієї мети передбачається дослідити вплив типових відмов випрямляча на параметри електричної енергії, розробити алгоритм діагностики несправностей на основі гармонічного аналізу та перевірити ефективність запропонованого підходу за допомогою моделювання і експериментальних досліджень.

Основний зміст. Було проведено аналіз простих прикладів несиметричних навантажень, зокрема випадку підключення активного опору між фазами у мережі з ізольованою нейтраллю, що демонструє можливість виникнення струмів, які на перший погляд створюють враження реактивної складової, хоча

навантаження є виключно активним. Також було запропоновано використання рівняння балансу лінійних напруг і струмів для аналізу таких режимів, що дозволяє пояснити виникнення нескінченної кількості розв'язків та необхідність введення додаткового критерію для їх однозначного визначення [1; 2].

Миттєвий струм, який 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:

$$i_{bc} = i_{ca} - i_c; \quad (1)$$

$$i_{ab} = i_a + i_{ca}. \quad (2)$$

Наступні вирази представляють усі миттєві потужності, в трифазному колі. Миттєва потужність є добутком сили миттєвих струму і напруги у відповідній гілці: АВ, ВС і СА. Іншими словами, потужність – це швидкість передачі або перетворення енергії:

$$p_{ab} = u_{ab} \cdot i_{ab}; \quad (3)$$

$$p_{bc} = u_{bc} \cdot i_{bc}; \quad (4)$$

$$p_{ca} = u_{ca} \cdot i_{ca}. \quad (5)$$

Сумарна миттєва потужність усіх трьох гілок:

$$p_{sum} = p_{ab}^2 + p_{bc}^2 + p_{ca}^2. \quad (6)$$

Наступний вираз представляє похідну від миттєвої потужності по струму i_{bc} . Виявлення коренів, де ця похідна дорівнює нулю, необхідне для визначення точки екстремуму:

$$\gamma_{pi} = \frac{\partial p_{sum}}{\partial i_{bc}}, \quad (7)$$

$$\gamma_{pi} = (2i_a + 2i_{ca})u_{ab}^2 + (2i_{ca} + 2i_c)u_{bc}^2 + 2i_{ca}u_{ca}^2. \quad (8)$$

Коренем виразу (8) є i_{car} – це значення i_{ca} , при якому γ_{pi} має екстремальне значення (максимум або мінімум):

$$i_{car} = -\frac{i_a u_{ab}^2 - i_c u_{bc}^2}{u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2}. \quad (9)$$

Підставляючи у (2) та (3) отримує i_{abr} – це значення i_{ab} , при якому γ_{pi} має екстремальне значення (максимум або мінімум):

$$i_{abr} = \frac{i_a - (i_a u_{ab}^2 - i_c u_{bc}^2)}{u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2}. \quad (10)$$

Далі i_{bcr} – це значення i_{bc} , при якому γ_{pi} має екстремальне значення (максимум або мінімум):

$$i_{bcr} = \frac{-i_c - (i_a u_{ab}^2 - i_c u_{bc}^2)}{u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2}. \quad (11)$$

Цей метод розрахунку лінійних струмів отримав назву найменша сума квадратів лінійних потужностей і був застосований до моделі фрагмента живлючої мережі тягової підстанції та перетворювача [3; 4].

Модель складної електроенергетичної підсистеми, що включає лінію електропередачі, трансформатор і випрямляч (рис. 1), є характерною для мереж метрополітену.

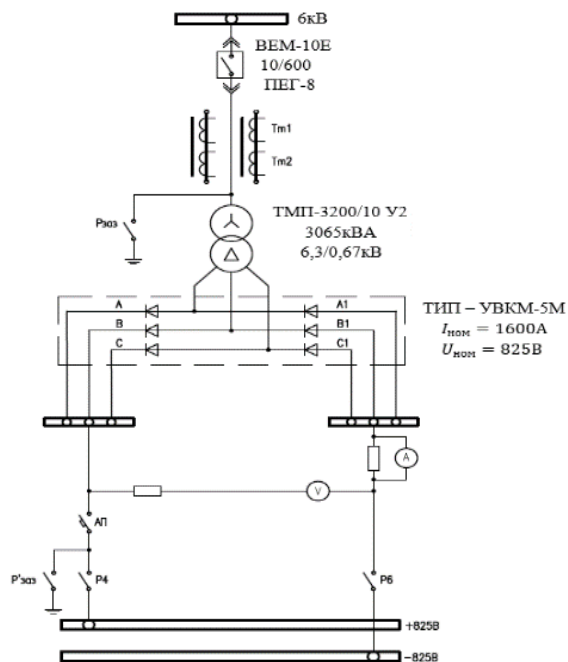


Рис. 1. Однолінійна схема живлення РУ 825В

У процесі побудови моделі особливу увагу було приділено узгодженню параметрів елементів мережі із типовими характеристиками реальних систем метрополітену. У дослідження також було включено вплив зовнішніх збурень, таких як короточасні перенапруги або коливання навантаження, які можуть сприяти ініціації відмов діодів. Для валідації моделі були використані дані з промислових вимірювань, отриманих на тяговій підстанції КП «Харківський метрополітен». Це дозволило підвищити достовірність отриманих результатів та адаптувати підхід до практичних умов експлуатації.

Для ефективного управління такою системою необхідно детально розуміти взаємодію між її компонентами. Зокрема, важливим є аналіз наслідків виходу з ладу діодів у шестисторовій випрямній схемі. Оскільки діоди є ключовими елементами випрямляча, їхня надійність відіграє критичну роль у стабільності роботи всієї системи. Аварійні режими, спричинені відмовами цих елементів, можуть викликати значні збої в електромережі та погіршення якості електроенергії [5; 6].

Лінія електропередачі є основним засобом передачі електроенергії від джерела до споживача. Її характеристики, такі як імпеданс, довжина та конфігурація, мають вирішальне значення для ефективності передачі електроенергії [7; 8].

Трансформатор використовується для зміни рівнів напруги, що дає змогу оптимізувати режими роботи системи та забезпечити взаємодію між її складовими [9; 10].

Випрямляч, у свою чергу, відіграє ключову роль у перетворенні змінного струму на постійний, що

необхідно для живлення різних споживачів або зарядних процесів [11; 12].

Поєднуючи ці три компоненти в єдину модель, можна дослідити динаміку їх взаємодії та визначити оптимальні параметри роботи системи.

В табл. 1 наведені технічні дані та характеристики трансформатора.

Таблиця 1 – Технічні дані та характеристики трансформатора ТМП-3200/10 У2

№	Основні технічні характеристики	Величина
1	Номинальна потужність мережевої обмотки, В	3065 кВА
2	Номинальна частота мережі	50 Гц
3	Номинальна напруга мережевої обмотки	6300 В
4	Номинальний струм мережевої обмотки	281 А
5	Номинальна напруга вентильної обмотки	679 В
6	Номинальний струм вентильної обмотки	1510 А
7	Умовно зображення схеми та групи з'єднання обмоток	Y/Δ-11
8	Втрати короткого замикання трансформатора при 75°C	25,9 кВт
9	Напруга короткого замикання трансформатора при 75°C	9,4 %
10	Втрати потужності холостого ходу трансформатора	7,2 кВт
11	Струм холостого ходу трансформатора	1,64 %
12	Сумарні втрати агрегата	33,1 кВт

В табл. 2 наведені технічні дані та характеристики випрямляча УВКМ-5М.

Таблиця 2 – Технічні дані та характеристики випрямляча УВКМ-5М

№	Основні технічні характеристики	Величина
1	Номинальна напруга живленої мережі, В	6,3 кВ
2	Номинальний випрямлений струм, А	3700 А
3	Номинальний випрямлена напруга, В	825 В
4	ККД перетворювальної установки не менше	97,5 %
5	Коефіцієнт потужності	0,96
6	Тип діодів	ВЛ-200-10
7	Кількість діодів	192

У нормальних умовах роботи електроенергетичної системи графіки напруги та струму демонструють стабільність і рівномірність процесів у мережі. На рис. 2 і 3 відображено відповідні залежності.

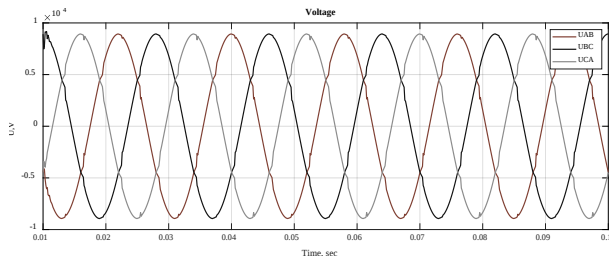


Рис. 2. Графік лінійної напруги при нормальних умовах роботи

Рис. 2 ілюструє зміну напруги u від часу t , де криві u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} це миттєві значення лінійних напруг. Представлений графік дає можливість

аналізувати роботи електричної системи в нормальних умовах.

Рис. 3 показує миттєві значення лінійних струмів та залежність струмів від часу: i_{ab} , i_{bc} , i_{ca} . Ці струми мають зубчасту форму. Вони чергуються між позитивними та негативними значеннями.

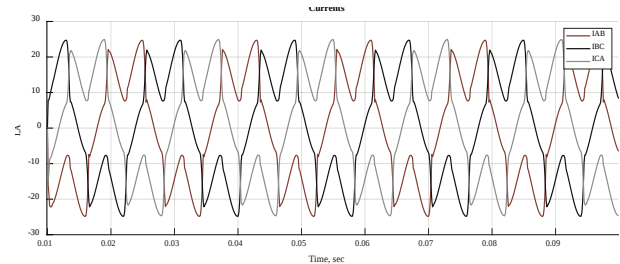


Рис. 3. Графік лінійного струму при нормальних умовах роботи

Одним із найбільш імовірних аварійних випадків у розглянутій схемі є вихід з ладу одного з плечей випрямляча. Відмова діода означає втрату його здатності виконувати свої функції, що може мати різні причини [13; 14]:

- термічне пошкодження – перегрів діода через надмірний струм або недостатнє охолодження може спричинити його вихід з ладу;

- електростатичний розряд (ЕСР): діоди чутливі до впливу електростатичних розрядів, особливо під час монтажу. Високовольтний імпульс може призвести до внутрішніх пошкоджень;

- поверхневі дефекти: мікротріщини чи інші поверхневі пошкодження можуть порушити герметичність діода, що згодом призведе до його несправності;

- перевантаження напругою: якщо діод піддається впливу напруги, що перевищує допустиме зворотне значення, це може спричинити його пробій;

- відмова в режимі збою: це відбувається, коли діод перестає блокувати обернений струм, пропускаючи його в обох напрямках. Така відмова зазвичай вказує на внутрішнє пошкодження;

- старіння: як і всі електронні компоненти, діоди з часом втрачають свої експлуатаційні характеристики;

- розрив у ланцюзі: діод перестає проводити струм у прямому напрямку, що еквівалентно розриву ланцюга, спричиняючи переривання струму в схемі.

Було проведено аналіз наслідків виходу з ладу одного діода у випрямлячі.

На рис. 4 представлені залежності миттєві значення лінійних напруг u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} від часу t .

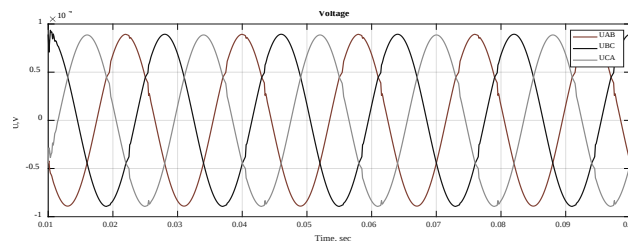


Рис. 4. Графік лінійної напруги при аварійному режимі роботи

Як видно з графіка, відмова одного діода не спричиняє змін у формі та значенні лінійної напруги. Окрім цього, було визначено значення зворотної лінійної напруги, яке становить $u_{rev_l} = 68,3587$ В.

На рис. 5 відображено залежності миттєвих значень лінійних струмів: i_{ab} , i_{bc} , i_{ca} від часу t . Як і у випадку нормальної роботи (рис. 3), ці струми мають пілоподібну форму. Проте на графіку помітно, що значення i_{ca} та i_{bc} мають лише одне пікове значення за півперіод позитивних значень, тоді як у нормальному режимі спостерігається два піки за один період.

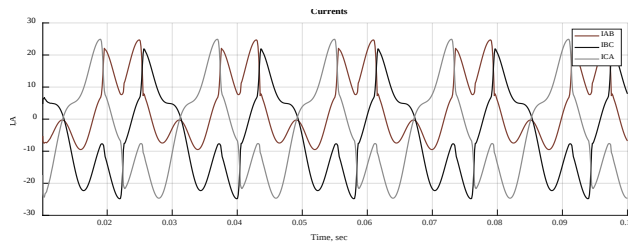


Рис. 5. Графік лінійного струму при аварійному режимі роботи

Значення зворотного лінійного струму $i_{rev_l} = 15,1081$ А.

На рис. 6 та 7 представлено гармонійний аналіз лінійних напруг та струмів, проведений на основі раніше розглянутого методу.

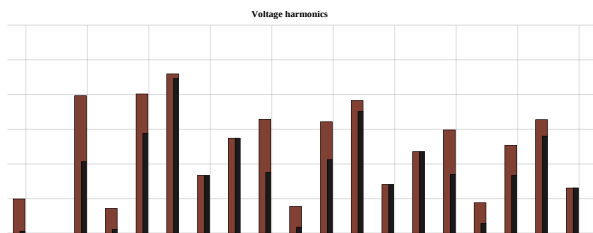


Рис. 6. Гістограма гармонік лінійних напруг при аварійному режимі роботи (відмова діода в одній фазі)

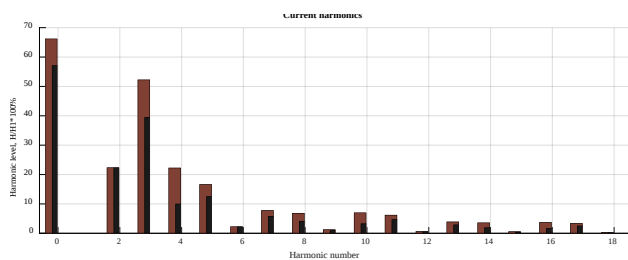


Рис. 7. Гістограма гармонік лінійних струмів при аварійному режимі роботи (відмова діода в одній фазі)

Гармонічні складові напруги (u_{ab} , u_{bc} , u_{ca}) мають близькі значення, що вказує на відносно симетричний характер гармонічних спотворень у системі. Загальний рівень гармонік не перевищує 0,6 %, що є допустимим показником.

Аналіз гармонік струму показує, що найбільше значення має 0-ва гармоніка, а також високі значення 3-ї гармоніки, що вказує на значне спотворення через проблеми у випрямлячі. Загальна тенденція демонструє зниження амплітуди зі збільшенням порядку гармонік, проте високі пікові значення

можуть свідчити про можливий резонанс у системі. Розподіл гармонік у струмі вказує на критичні несправності у системі випрямлення, що потребує додаткового аналізу та коригування [15; 16].

Висновки. У ході дослідження розглянуто особливості розподілу струмів і напруг у мережах із ізольованою нейтраллю при несиметричних режимах роботи. Показано, що навіть суто активне навантаження може створювати ефект зсуву фазних кутів, що потребує детального аналізу для правильного оцінювання роботи мережі. Запропоновано підхід до розрахунку лінійних струмів за критерієм найменшої суми квадратів лінійних потужностей, що дозволяє точніше визначати параметри системи.

Досліджено вплив відмови одного з діодів у шестиступеновому випрямлячі на електроенергетичну систему, що підтверджено аналізом гармонійного складу напруг і струмів. Виявлено, що такі відмови спричиняють значні гармонічні спотворення, що може негативно впливати на роботу електрообладнання та якість електроенергії. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методик діагностики несправностей у випрямлячах та розробки заходів щодо підвищення надійності роботи електроенергетичних мереж.

Крім аналітичних результатів, отриманих у процесі моделювання, варто відзначити актуальність застосування розглянутого методу для практичного моніторингу стану випрямлячів у системах електропостачання. Врахування гармонічного складу та часових залежностей дозволяє реалізувати діагностичні алгоритми у режимі реального часу, що є перспективним напрямом для впровадження у сучасних системах диспетчерського керування.

Список літератури

1. Дем'яненко Р. І. Розрахунок миттєвих лінійних струмів трифазної мережі з ізольованою нейтраллю. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. Харків : НТУ «ХПІ». 2022. № 1 (4). С. 17–22. doi: 10.20998/2224-0349.2022.01.09
2. Дем'яненко Р. І. Розрахунок трифазних миттєвих лінійних струмів при несиметричних напругах. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 99–106. doi: 10.20998/2413-4295.2024.01.13
3. Tomita M., Fukumoto Y., Ishihara A., Kobayashi Y., Akasaka T., Suzuki K., Onji T. Superconducting DC power transmission for subway lines that can reduce electric resistance and save energy. *Energy*. 2023. Vol. 281. P. 128250. doi: 10.1016/j.energy.2023.128250
4. Liu G., Ding N., Zhou J., Xu N., Guo W. Fracture failure of dropper wires in the power supply system of a subway line. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2021. Vol. 21, issue 2. P. 370–375. doi: 10.1007/s11668-020-01077-4
5. Doan V. D. A research on the load calculation method in designing the traction power supply for integrated subway – MCR. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2023. Vol. 13, issue 3. P. 10882–10887. doi: 10.48084/etasr.5909
6. Haili C. Energy-saving design and implementation in metro weak current systems: a case study of the Kunming metro system. *Urban Rail Transit*. 2021. Vol. 7, issue 4. P. 301–333. doi: 10.1007/s40864-021-00158-3
7. Li P., Liu C., Tong X., Li X., Zheng G. Improved direct ripple power predictive control of single-phase rectifier based on ripple separation. *Control Engineering Practice*. 2025. Vol. 155. P. 106173. doi: 10.1016/j.conengprac.2024.106173
8. Xu D., Bai Z., Wang T., Wu Z., Zhang K. An energy-based control scheme for optimal power quality management in 12-pulse rectifier

- integrated distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023. Vol. 145. P. 108707. doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108707
9. Zhao T., Sun Z., Du L., Feng Z., Lin S. LVRT Control Strategy for Three-Phase CHB PV Inverter Based on Coordinated Compensation of Fundamental-Frequency Adaptive Zero-Sequence Voltage and its Odd Harmonics. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024. Vol. 60, issue 3. P. 4012–4024. doi: 10.1109/TIA.2024.3355376
 10. 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. Vol. 11, issue 2. P. 132. doi: 10.3390/machines11020132
 11. Kirgizov A., Dmitriev S., Safaraliev M., Pavlyuchenko D., Ghulomzoda A., Ahyoev J. Expert system application for reactive power compensation in isolated electric power systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021. Vol. 11. P. 3682–3691. doi: 10.11591/ijece.v11i5.pp3682-3691
 12. Mohd N. K. A., Abdullah N. Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 22. P. 102242. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102242
 13. Vijayakumar A., Stonier A. A., Peter G., Loganathan A. K., Ganji V. Power quality enhancement in asymmetrical cascaded multilevel inverter using modified carrier level shifted pulse width modulation approach. *IET Power Electronics*. 2022. doi: 10.1049/pel2.12429
 14. Ioana G., Cazacu E., Stănculescu M., Pușcașu S. Power factor correction and harmonic mitigation for a heavy industrial nonlinear load. *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) (23–25 March 2023, Bucharest, Romania)*. IEEE, 2023. P. 1–6. doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108358
 15. Zhang Y., Sun X. Phase reassignment strategy and load phase-swapping device for three-phase unbalance in the power distribution area. *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 235. P. 110564. doi: 10.1016/j.epsr.2024.110564
 16. Zhang M., Luo S., Liu Y., Zhuang X., Ma W. Analysis of the traction forces of two adjacent linear induction motors. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. P. 26760. doi: 10.1038/s41598-024-78334-1
 - Energy. 2023, vol. 281, p. 128250. doi: 10.1016/j.energy.2023.128250
 4. Liu G., Ding N., Zhou J., Xu N., Guo W. Fracture failure of dropper wires in the power supply system of a subway line. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2021, vol. 21, issue 2, pp. 370–375. doi: 10.1007/s11668-020-01077-4
 5. Doan V. D. A research on the load calculation method in designing the traction power supply for integrated subway – MCR. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2023, vol. 13, issue 3, pp. 10882–10887. doi: 10.48084/etasr.5909
 6. Haili C. Energy-saving design and implementation in metro weak current systems: a case study of the Kunming metro system. *Urban Rail Transit*. 2021, vol. 7, issue 4, pp. 301–333. doi: 10.1007/s40864-021-00158-3
 7. Li P., Liu C., Tong X., Li X., Zheng G. Improved direct ripple power predictive control of single-phase rectifier based on ripple separation. *Control Engineering Practice*. 2025, vol. 155, p. 106173. doi: 10.1016/j.conengprac.2024.106173
 8. Xu D., Bai Z., Wang T., Wu Z., Zhang K. An energy-based control scheme for optimal power quality management in 12-pulse rectifier integrated distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023, vol. 145, p. 108707. doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108707
 9. Zhao T., Sun Z., Du L., Feng Z., Lin S. LVRT Control Strategy for Three-Phase CHB PV Inverter Based on Coordinated Compensation of Fundamental-Frequency Adaptive Zero-Sequence Voltage and its Odd Harmonics. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024, vol. 60, issue 3, pp. 4012–4024. doi: 10.1109/TIA.2024.3355376
 10. 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, vol. 11, issue 2, p. 132. doi: 10.3390/machines11020132
 11. Kirgizov A., Dmitriev S., Safaraliev M., Pavlyuchenko D., Ghulomzoda A., Ahyoev J. Expert system application for reactive power compensation in isolated electric power systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021, vol. 11, pp. 3682–3691. doi: 10.11591/ijece.v11i5.pp3682-3691
 12. Mohd N. K. A., Abdullah N. Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter. *Results in Engineering*. 2024, vol. 22, p. 102242. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102242
 13. Vijayakumar A., Stonier A. A., Peter G., Loganathan A. K., Ganji V. Power quality enhancement in asymmetrical cascaded multilevel inverter using modified carrier level shifted pulse width modulation approach. *IET Power Electronics*. 2022. doi: 10.1049/pel2.12429
 14. Ioana G., Cazacu E., Stănculescu M., Pușcașu S. Power factor correction and harmonic mitigation for a heavy industrial nonlinear load. *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) (23–25 March 2023, Bucharest, Romania)*. IEEE Publ., 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108358
 15. Zhang Y., Sun X. Phase reassignment strategy and load phase-swapping device for three-phase unbalance in the power distribution area. *Electric Power Systems Research*. 2024, vol. 235, p. 110564. doi: 10.1016/j.epsr.2024.110564
 16. Zhang M., Luo S., Liu Y., Zhuang X., Ma W. Analysis of the traction forces of two adjacent linear induction motors. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, p. 26760. doi: 10.1038/s41598-024-78334-1

References (transliterated)

1. Dem'yanenko R. I. Rozrakhunok myttyevykh liniynykh strumiv tryfaznoyi merezhi z izolo'vanoyu neytrallyu [Calculation of instantaneous line currents in a three-phase network with an isolated neutral]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Seriya: Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoeffektyvnist'* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Power System Reliability and Energy Efficiency]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1 (4), pp. 17–22. doi: 10.20998/2224-0349.2022.01.09
2. Dem'yanenko R. I. Rozrakhunok tryfaznykh myttyevykh liniynykh strumiv pry nesymetrychnykh napruhakh [Calculation of three-phase instantaneous line currents under unbalanced voltages]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 1 (19), pp. 99–106. doi: 10.20998/2413-4295.2024.01.13
3. Tomita M., Fukumoto Y., Ishihara A., Kobayashi Y., Akasaka T., Suzuki K., Onji T. Superconducting DC power transmission for subway lines that can reduce electric resistance and save energy. *Energy*. 2023, vol. 281, p. 128250. doi: 10.1016/j.energy.2023.128250
4. Liu G., Ding N., Zhou J., Xu N., Guo W. Fracture failure of dropper wires in the power supply system of a subway line. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2021, vol. 21, issue 2, pp. 370–375. doi: 10.1007/s11668-020-01077-4
5. Doan V. D. A research on the load calculation method in designing the traction power supply for integrated subway – MCR. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2023, vol. 13, issue 3, pp. 10882–10887. doi: 10.48084/etasr.5909
6. Haili C. Energy-saving design and implementation in metro weak current systems: a case study of the Kunming metro system. *Urban Rail Transit*. 2021, vol. 7, issue 4, pp. 301–333. doi: 10.1007/s40864-021-00158-3
7. Li P., Liu C., Tong X., Li X., Zheng G. Improved direct ripple power predictive control of single-phase rectifier based on ripple separation. *Control Engineering Practice*. 2025, vol. 155, p. 106173. doi: 10.1016/j.conengprac.2024.106173
8. Xu D., Bai Z., Wang T., Wu Z., Zhang K. An energy-based control scheme for optimal power quality management in 12-pulse rectifier integrated distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023, vol. 145, p. 108707. doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108707
9. Zhao T., Sun Z., Du L., Feng Z., Lin S. LVRT Control Strategy for Three-Phase CHB PV Inverter Based on Coordinated Compensation of Fundamental-Frequency Adaptive Zero-Sequence Voltage and its Odd Harmonics. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024, vol. 60, issue 3, pp. 4012–4024. doi: 10.1109/TIA.2024.3355376
10. 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, vol. 11, issue 2, p. 132. doi: 10.3390/machines11020132
11. Kirgizov A., Dmitriev S., Safaraliev M., Pavlyuchenko D., Ghulomzoda A., Ahyoev J. Expert system application for reactive power compensation in isolated electric power systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021, vol. 11, pp. 3682–3691. doi: 10.11591/ijece.v11i5.pp3682-3691
12. Mohd N. K. A., Abdullah N. Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter. *Results in Engineering*. 2024, vol. 22, p. 102242. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102242
13. Vijayakumar A., Stonier A. A., Peter G., Loganathan A. K., Ganji V. Power quality enhancement in asymmetrical cascaded multilevel inverter using modified carrier level shifted pulse width modulation approach. *IET Power Electronics*. 2022. doi: 10.1049/pel2.12429
14. Ioana G., Cazacu E., Stănculescu M., Pușcașu S. Power factor correction and harmonic mitigation for a heavy industrial nonlinear load. *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) (23–25 March 2023, Bucharest, Romania)*. IEEE Publ., 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108358
15. Zhang Y., Sun X. Phase reassignment strategy and load phase-swapping device for three-phase unbalance in the power distribution area. *Electric Power Systems Research*. 2024, vol. 235, p. 110564. doi: 10.1016/j.epsr.2024.110564
16. Zhang M., Luo S., Liu Y., Zhuang X., Ma W. Analysis of the traction forces of two adjacent linear induction motors. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, p. 26760. doi: 10.1038/s41598-024-78334-1

Надійшло (received) 17.09.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Дем'яненко Роман Ігорович (Demianenko Roman) – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0902-2607>; e-mail: roman.demianenko@khi.edu.ua

Солодовник Андрій Олександрович (Solodovnyk Andrii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3196-3530>; e-mail: andrii.solodovnyk@ieee.khi.edu.ua

Мацугія Дмитро Сергійович (Matsugyria Dmytro) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1175-3909>; e-mail: dmytro.matsugyria@ieee.khi.edu.ua

Светелік Олександр Олександрович (Svetelik Oleksandr) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7005-6761>; e-mail: oleksandr.svetelik@ieee.khi.edu.ua