

## РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., Дяченка Олександра Васильовича  
на дисертаційну роботу Дем'яненка Романа Ігоровича  
«Методи та засоби аналізу несиметричних режимів роботи електротехнічного  
обладнання»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань

14 – «Електрична інженерія» за спеціальністю

141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Детальний аналіз дисертаційної роботи Дем'яненка Романа Ігоровича на тему «Методи та засоби аналізу несиметричних режимів роботи електротехнічного обладнання», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дає змогу зробити комплексний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

### **1. Актуальність теми.**

Дисертаційне дослідження присвячене актуальній проблемі аналізу несиметричних режимів роботи електротехнічного обладнання в системах метрополітену. З огляду на високу залежність сучасних мегаполісів від безперебійної роботи електротранспорту, зокрема метрополітену, питання забезпечення стабільної та ефективної роботи таких систем набуває особливої ваги.

Несиметричні режими роботи електротехнічного обладнання можуть суттєво впливати на надійність та ефективність електричних систем. Вони призводять до нерівномірного розподілу навантаження, збільшення втрат енергії, прискореного зносу обладнання та можуть стати причиною серйозних

аварійних ситуацій. Враховуючи це, розробка та впровадження новітніх методів для ідентифікації, аналізу та контролю несиметричних режимів є важливим завданням для підвищення надійності та ефективності роботи електротехнічних систем метрополітену.

Системи метрополітену є складними та критично важливими об'єктами інфраструктури міста, що підвищує вимоги до їх стабільної та надійної роботи. У дисертаційній роботі аналізується вплив несиметричних режимів на роботу електротехнічного обладнання, визначаються їх основні причини та пропонуються шляхи їх усунення.

Таким чином, тема дисертації є актуальною як з теоретичної, так і з практичної точки зору. Вона спрямована на вирішення нагальних питань підвищення ефективності та надійності електротехнічних систем метрополітену, що має важливе значення для забезпечення безперебійного функціонування транспортної інфраструктури великих міст.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі «Автоматизація та кібербезпека енергосистем» НТУ «ХПІ» відповідно до наукової програми 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Проведені дослідження тісно пов'язані із темою за власною ініціативи: 1.«Дослідження якості електричної енергії в електричних мережах підприємств комунального господарства» (0123U104279).

## **3. Наукова новизна одержаних результатів.**

Дисертація містить наукову новизну, з найбільш суттєвих доробок роботи можна назвати наступне:

– *вперше запропоновані* методи розрахунку миттєвих лінійних струмів за критеріями найменшої суми квадратів струмів, найменшої суми квадратів потужностей та максимального миттєвого коефіцієнта потужності;

– *доведено*, що при виконанні умови нульової суми лінійних напруг струми за критерієм максимального миттєвого коефіцієнта потужності збігаються зі струмами за найменшою сумою квадратів;

– *визначено* ефективність запропонованих методів розрахунків лінійних струмів при дослідженнях робочих режимів та несиметричних відмов у напівпровідниковому перетворювачі за схемою Ларіонова;

– *вперше запропоновано* метод діагностування напівпровідникового перетворювача тягової підстанції у реальному часі в процесі його функціонування за розрахованими миттєвими лінійними струмами.

Вважаю, що в дисертаційній роботі вперше в Україні було розроблено комплексний підхід до аналізу несиметричних режимів роботи електротехнічного обладнання метрополітену і вимірювання миттєвих значень струму та напруги.

#### **4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання.**

Результати досліджень полягають в їхньому безпосередньому застосуванні для покращення експлуатаційних характеристик електротехнічного обладнання. Застосування розроблених методів та засобів аналізу несиметричних режимів дозволить:

– покращити надійність функціонування обладнання на основі своєчасного ідентифікування та діагностування несиметричних режимів роботи та відмов, що сприяє запобіганню пошкодженню обладнання та зниженню ризику аварійних ситуацій;

– оптимізувати процеси технічного обслуговування, переходячи від планово-попереджувального до обслуговування залежно від фактичного стану обладнання (*condition-based maintenance*);

– підвищити безпеку пасажирських перевезень, забезпечити стабільну та надійну роботу електротехнічного обладнання метрополітену, зменшуючи ймовірність аварій, пов'язаних з електропостачанням;

- розширити наукові та технічні знання при розробці нових поколінь обладнання та систем електропостачання;
- підвищити енергоефективність споживання електроенергії та систем метрополітену в цілому.

Методи та засоби, розроблені в межах даної дисертаційної роботи, використані в роботі КП «Харківський метрополітен» (акт про впровадження від 01.05.2024 р.) і в навчальному процесі на кафедрі «Автоматизація та кібербезпека енергосистем» Національного технічного університету «ХПІ» (акт про впровадження 02.05.2024 р.).

#### **5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором.**

За результатами дослідження дисертаційної роботи опубліковано 8 наукових праць, з них у фахових наукових виданнях, рекомендованих ДАК Міністерства освіти і науки України – 4, у реферативній базі Scopus – 3 (Q3), наукових праць, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації – 5. Зазначене вище дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого мають значення для вирішення задачі забезпечення надійного функціонування електричної частини тягових підстанцій метрополітену.

#### **6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.**

Дисертація Дем'яненка Романа Р.І. є завершеною науковою роботою, містить дві анотації – українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, висновки, список літератури і додатки.

Дослідження виконано на основі фундаментальних положень теоретичної електротехніки, використовуючи методи математичного та фізичного моделювання несиметричних режимів роботи електротехнічного обладнання. Робота також спирається на аналітичні та чисельні методи аналізу, що

дозволяють точно оцінювати параметри електричних мереж. Використання сучасних інформаційних технологій забезпечує високу точність і ефективність проведених досліджень та їх практичну значущість.

*Об'єктом дослідження* є несиметричні режими роботи та їх вплив на роботу електротехнічного обладнання в системах метрополітену. *Предметом досліджень* є способи виявлення несиметричних режимів, їх аналізу, інтерпретації та контролю таких режимів роботи електротехнічного обладнання тягових підстанцій.

У першому розділі на основі аналізу закордонних та вітчизняних публікацій проаналізовано існуючі методи аналізу несиметричних режимів роботи. Актуальність задачі показана за допомогою даних вимірювань якості електроенергії на приєднаннях ПС магістральних мереж СМЕС і ПС АТ «ЮЖД» за допомогою мікропроцесорних аналізаторів напруг і струмів. Вимірювання проводилися безперервно протягом семи діб. Виявлено, що гармонічні складові значно перевищують нормовані значення, особливо 11-та і 13-та гармонічні складові. Далі в розділі наведені результати вимірювань якості електроенергії, включаючи графіки відхилень міжфазних і фазних напруг та коефіцієнти гармонік. Виявлено, що найбільше впливають 5-та і 7-ма гармонічні складові, які зумовлені схемою випрямлення змінного струму. Розділ також містить характеристику системи електропостачання метрополітену. Метрополітен є одним з найпотужніших споживачів електрики, що вимагає надійності та безперебійності постачання. Електропостачання забезпечується від трьох незалежних джерел живлення, щоб запобігти аваріям та забезпечити безпеку пасажирів. Описується класифікація електроприймачів метрополітену, які включають електричні потяги, ескалатори, освітлення, вентиляційні системи, помпові установки та системи сигналізації. Наведені рекомендації щодо покращення енергоефективності метрополітену, включаючи впровадження енергоефективного освітлення, регенеративного гальмування, оптимізацію роботи ескалаторів та використання відновлюваних джерел енергії. Таким чином, перший розділ дисертації детально розглядає питання

контролю якості електричної енергії в мережі метрополітену, виявляє основні проблеми та пропонує шляхи їх вирішення. Виконана постановка задач дисертаційних досліджень.

У *другому розділі* розглядаються методи розрахунку миттєвих лінійних струмів у несиметричних режимах електротехнічних систем метрополітену. Основна увага приділяється теоретичним аспектам і критеріям визначення миттєвих струмів, зокрема, за допомогою методів найменшої суми квадратів струмів, найменшої суми квадратів потужностей та максимального миттєвого коефіцієнта потужності. Ці методи дозволяють краще зрозуміти несиметрію та її вплив на загальну стабільність електричної системи. Розглядаються два випадки простих несиметричних навантажень. У першому випадку активний опір підключений між фазами А та В, що призводить до виникнення струму у фазі А, який є зсунутим відносно напруги на  $150^\circ$  і  $30^\circ$  градусів. У другому випадку аналіз проводиться за аналогічним підходом, але він також не дозволяє визначити структуру навантаження. Для розв'язання задачі аналізу несиметричних режимів у мережі з ізольованою нейтраллю пропонується використовувати систему лінійних напруг та лінійних струмів, яка має нескінченну кількість рішень і потребує додаткового критерію для визначення значень лінійних струмів. Запропоновані методи розрахунку лінійних струмів за критеріями найменшої середньоквадратичної суми струмів, найменшої суми квадратів потужностей та максимального миттєвого коефіцієнта потужності. Кожен з цих методів представлений через математичні рівняння та похідні, які дозволяють знаходити екстремуми і визначати миттєві струми у різних гілках системи. Також розглядається перехід від миттєвих значень до їх послідовностей у часі для використання розроблених методів у безперервному та дискретному часі. Це дозволяє застосовувати ці методи для аналізу несиметричних режимів у реальних умовах експлуатації електричних систем метрополітену.

У *третьому розділі* присвячений аналізу несиметричних режимів трифазного перетворювача тягової підстанції метрополітену. Моделювання

технологічних процесів є особливо актуальним у сучасних наукових дослідженнях, оскільки дозволяє значно зменшити вартість досліджень, скоротити терміни та підвищити безпеку, уникаючи коштовних експериментів з реальним обладнанням. Коректна побудова моделі є вирішальною для адекватного аналізу режимів роботи, оптимізації параметрів, а також прогнозування реакцій системи на різні внутрішні та зовнішні збурення. У першій підсекції розділу описано побудову моделі фрагмента живлючої мережі тягової підстанції та перетворювача. Увага приділяється взаємодії між її компонентами – лінією передачі, трансформатором і випрямлячем. Зокрема, розглядається вплив відмови діодів на функціональність шести мостової випрямленої схеми. Друга підсекція розділу зосереджена на розрахунку параметрів моделі трансформатора та випрямляча. Наведено докладні конфігурації ліній передачі, параметри трансформатора ТМП-3200/10 У2, а також технічні дані і характеристики випрямляча УВКМ-5М. Розрахунки включають активний опір, індуктивність обмоток трансформатора, активний опір та індуктивність намагнічування, а також технічні характеристики діодів, що використовуються у випрямлячі. У третій підсекції йдеться про моделювання нормального режиму роботи схеми тягової підстанції. Представлені графіки напруги та струму демонструють стабільність та рівномірність процесів у мережі за нормальних умов роботи. Описуються миттєві значення фазових та лінійних напруг і струмів, їх синусоїдальний характер і фазова різниця у 120 градусів. Завдяки детальному аналізу нормального та аварійного режимів роботи трифазного перетворювача, розділ забезпечує всебічне розуміння роботи електроенергетичної підсистеми метрополітену, що є критично важливим для забезпечення стабільної роботи системи, оптимізації параметрів та підвищення надійності електропостачання.

*Чет верт ий розділ дисертації зосереджений на експериментальних дослідженнях несиметричних режимів роботи електротехнічного обладнання тягових підстанцій метрополітену з використанням приладу АНТЕС-2. Особлива увага приділяється аналізу двох конкретних подій, що були*

zareєстровані та аналізовані для ідентифікації потенційних викликів і можливостей для покращення системи. Перша частина розділу присвячена детальному опису приладу АНТЕС-2, його технічних характеристик і вимірювальних параметрів. Прилад АНТЕС-2 призначений для обліку електричної енергії та контролю за її якісними показниками, що включає вимірювання частоти мережі, фазних і лінійних напруг, фазних струмів, потужностей, гармонічних складових, коефіцієнтів гармонійних спотворень, коефіцієнтів потужності, коефіцієнтів втрат, коефіцієнтів несиметрії напруги та струмів, а також перевищення гармонік струму та потужності споживання. У розділі аналізуються результати досліджень при наявності провалу напруги до рівня 85%. Ця подія ідентифікується як короткочасне зниження величини напруги нижче номінального рівня протягом 0.140 секунди. Було виявлено значне падіння напруги в одній фазі системи, що вказує на основні проблеми, які можуть вимагати подальшого дослідження та усунення для забезпечення надійності та безпеки служби метро. Розділ містить графіки фазних і лінійних напруг та струмів, які ілюструють залежність миттєвих значень напруги і струму від часу, зокрема під час несиметричного провалу напруги. На графіках представлено синусоїдальні форми напруг і струмів, їхні зміни амплітуд і частоти, що демонструє нестабільність напруги і струму в електричній мережі метрополітену. Результати гармонічного аналізу, представлені в розділі, показують значну дисперсію і спотворення струмів у системі, що може викликати технічні проблеми, такі як нагрівання обладнання та зниження його тривалості служби. Гармонічний склад лінійних напруг і струмів ілюструє спадання амплітуди зі збільшенням номера гармоніки, що є типовим для електричних мереж з нелінійними електроприймачами. Загалом, результати досліджень у четвертому розділі дозволяють краще зрозуміти динаміку несиметрії в електричних мережах метрополітену і сприяють розробці ефективних стратегій забезпечення стабільності та надійності обладнання.

*Висновки*, сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають

вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

*Список літератури* із 119 найменувань достатньо широко охоплює предметне поле дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості іноземних та вітчизняних джерел.

*Додаток* містить інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

## **7. Достовірність отриманих результатів та висновків.**

Достовірність результатів, отриманих у дисертації, підтверджено експериментальною перевіркою удосконаленої математичної моделі несиметричних режимів роботи електротехнічного обладнання тяговій підстанції ТЗ метрополітену. Моделі були підтверджені на основі реальних вимірювань, проведених приладом АНТЕС-2, на тягових підстанціях метрополітену, а також на основі експериментальних досліджень з використанням фізичних макетів відповідного обладнання. Результати експериментів показали високу точність моделювання і підтвердили теоретичні положення, отримані в дисертації.

## **8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях.**

Дисертація виконана з дотримання вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у чотирьох фахових статтях, трьох публікацій у інших наукових закордонних виданнях. Дисертант активно приймав участь в українських та закордонних конференціях, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

## 9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Незважаючи на високий рівень виконання та значущість отриманих результатів, у дисертаційній роботі Дем'яненко Р. І. можна виділити кілька недоліків та зауважень.

По-перше, варто зазначити, що у роботі не завжди чітко аргументуються вибори тих чи інших методів аналізу. Наприклад, при виборі методів математичного моделювання та розрахунків не завжди детально пояснюється, чому були обрані саме ці методи, а не інші, можливо, більш ефективні чи поширені в аналогічних дослідженнях. Це могло б підвищити переконливість і наукову обґрунтованість роботи.

По-друге, деякі експериментальні результати подано без достатнього обговорення можливих похибок вимірювань і факторів, які могли б вплинути на точність результатів. Детальний аналіз похибок та їх впливу на кінцеві результати є важливим аспектом наукового дослідження, який дозволяє оцінити надійність і достовірність отриманих даних.

По-третє, у роботі недостатньо уваги приділено порівнянню отриманих результатів з аналогічними дослідженнями вітчизняних та зарубіжних науковців. Такий порівняльний аналіз міг би продемонструвати новизну і унікальність отриманих результатів, а також їх відповідність світовим тенденціям у цій галузі.

По-четверте, варто звернути увагу на використання сучасних інформаційних технологій і програмного забезпечення для моделювання і аналізу. У роботі не завжди вказується, яке програмне забезпечення було використане, а також не наводиться оцінка його впливу на результати дослідження. Використання сучасних інструментів могло б підвищити точність і надійність отриманих результатів.

Незважаючи на ці зауваження, варто відзначити, що дисертаційна робота Дем'яненко Р. І. є вагомим внеском у дослідження несиметричних режимів роботи електротехнічного обладнання тягових підстанцій метрополітену. Недоліки не знижують наукової цінності та практичної значущості отриманих

результатів, а є скоріше рекомендаціями для подальшого вдосконалення досліджень у цій галузі.

#### 10. Висновки.

Дисертаційна робота Дем'яненко Р.І. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 14 – Електрична інженерія та спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та певну практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Дем'яненка Романа Ігоровича «Методи та засоби аналізу несиметричних режимів роботи електротехнічного обладнання» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам здобувач, Дем'яненко Роман Ігорович, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензент – кандидат технічних наук,  
доцент кафедри «Автоматизація та  
кібербезпека енергосистем»  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»

«25» 07 2024 р.

Підпис  **Олександр ДЯЧЕНКО**

ЗАСВІДЧУЮ:  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

«25» 07 2024 р. 

**ЗАЙЦЕВ Ю.І.**

