

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

БАБЕНКА Миколи Володимировича

**«Енергоефективна електротехнічна система катодного захисту
підземного сталевих трубопроводу»,**

що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 – «Електрична інженерія»

за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Актуальність теми. Підземні металеві трубопроводи, що використовують для транспортування газу, нафти і води, та відповідні металеві конструкції з часом зазнають руйнувань, пов'язаних з появою і розвитком різних корозійних механізмів. У разі прокладання підземного трубопроводу поблизу джерел електромагнітного впливу (електрифіковані залізниці, міський електротранспорт, повітряні та кабельні лінії електропередачі тощо) значно посилюються корозійні процеси, які призводять до значної руйнації металевих конструкцій. Для захисту трубопроводів від такої руйнації зазвичай використовують комбінований метод створення ізоляційного покриття на їх поверхні та здійснення катодної поляризації. Основним критерієм системи катодного захисту є наявність поляризаційного потенціалу, який для сталі повинен знаходитись у чітких межах відносно створеного анодного електроду, що є складною електротехнічною задачею.

Наукові роботи з дослідження систем катодного захисту у більшості випадків розглядали електрохімічні та електрофізичні процеси у замкненій системі «трубопровід – станція захисту – анод». На сьогодні не існує узагальненого підходу до побудови моделей для визначення залежностей захисного потенціалу сталевих трубопроводу, які враховують схемні

реалізацій катодних станцій та режими їх роботи, топології прокладки та геології ґрунтів.

Окремої уваги потребує організація електропостачання систем електротехнічного захисту трубопроводу від корозії. Враховуючи переважно віддалений характер і велику протяжність розташування цих об'єктів здійснення живлення станцій захисту від централізованих електричних мереж є достатньо непростю задачею. Ситуація особливо загострилась під час повномасштабних воєнних дій та викликаних ними постійних обмежень електропостачання.

Створення децентралізованих систем електропостачання на основі альтернативних джерел дозволить вирішувати питання автономності, стабілізації рівня захисного потенціалу у динамічних режимах джерел блукаючих струмів та наявності полімерних поздовжніх вставок на трубопроводах. У зв'язку з цим вдосконалення та розвиток концепції та моделей побудови децентралізованих систем електропостачання малої потужності з відновлюваними джерелами енергії для систем електрохімічного захисту є актуальною науковою задачею вирішенню якої і присвячено дисертаційну роботу Миколи Бабенка.

У дисертаційній роботі поставлена наукова задача вирішується шляхом дослідження енергоефективних режимів роботи автономних електрогенеруючих комплексів з відновлюваними джерелами енергії та системами керування вентильними перетворювачами, які забезпечують необхідний рівень електромагнітної сумісності, оптимізацію витрат електроенергії, та в результаті дозволяють створити децентралізовану розподілену систему живлення станцій захисту трубопроводу.

Ідея роботи, наукові положення, висновки та практичні результати, наведені в дисертаційній роботі Бабенка Миколи, є обґрунтованими та логічними.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційного дослідження.

Аналіз дисертаційної роботи Миколи Бабенка дозволяє зробити висновок, що отримані положення, висновки і рекомендації є науково-обґрунтованими та достовірними. Про це свідчать результати теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних з застосуванням сучасного й широко апробованого науково-методичного апарату системного аналізу, математичного моделювання, теоретичних основ електротехніки, електропостачання та електричних систем та мереж. Достовірність положень і висновків забезпечується перевіркою результатів на діючих об'єктах газотранспортної системи України та підтверджується актами впровадження у виробництво і навчальний процес.

Основні результати отримані Миколою Бабенком в дисертаційній роботі, які мають наукову новизну.

1. Розвинуто механізми вибору параметрів комплексного джерела автономного електропостачання станцій катодного захисту підземних сталевих трубопроводів з урахуванням режиму вентильних перетворювачів, умов прокладання трубопроводів та наявності неоднорідностей, що дозволяє реалізувати максимальну енергетичну ефективність роботи комплексу в умовах технологічних обмежень енергосистеми або блекаутах.

2. Аналіз особливостей формування умов ефективного захисту від електрохімічної корозії електротехнічного комплексу «підземний трубопровід – група станцій катодного катодного захисту» дозволив отримати їх унікальну режимну особливість, яка відрізняється врахуванням впливу неоднорідності ґрунту на градієнт захисного потенціалу, точкові неоднорідності у вигляді перетинів залізниць, автомобільних доріг, кабельних підземних ліній електропередачі, що дозволяє при стохастичному характеру графіку електричних навантажень станцій отримати енергоефективний режим даного електротехнічного комплексу.

3. Враховуючи обов'язкове дотримання жорстких вимог до розподілу захисного потенціалу по всій довжині трубопроводу, обґрунтована концепція модульного електрогенеруючого комплексу з відновлюваними джерелами енергії та вентильними перетворювачами, яка враховує, на відміну від існуючих, формування вихідного сигналу у спектральному діапазоні до 50 кГц DC/DC або DC/AC перетворювачів.

4. Вперше отримано аналітичні та графічні залежності параметрів електричного режиму станції катодного захисту для різних умов роботи по просторовій поздовжній координаті, що дозволяє істотно підвищити якість формування функції захисного потенціалу та має визначні особливості у вигляді змінної складової захисного потенціалу.

5. Вперше науково обґрунтовано необхідність і важливість врахування стохастичності електричних режимів навантаження для розробки універсальної методики вибору технічних параметрів комплексу електрохімічного захисту та встановлення оптимального режиму роботи за результатами моделювання графіків генерації електроенергії від вітроенергетичних та сонячних електростанцій за територіальним принципом.

6. Отримали подальший розвиток моделі електромагнітних процесів формування захисного потенціалу катодними станціями, які відрізняються від існуючих рівнем припущення щодо геометричних розмірів трубопроводів (діаметр труби, товщина стінки, матеріал, ізоляція), що дало можливість визначати значення потенціалу у будь-якій координаті відстані.

7. Вперше розроблено метод приєднання активних та пасивних катодних станцій, який відрізняється прийняттям умов прокладання траси трубопроводу, наявності перетинів з залізничними коліями, коліями міського електротранспорту, автомагістралей тощо, що дозволяє для кожної ділянки трубопроводів середнього та високого тиску приймати індивідуальну схему розподілу захисних станцій з урахуванням геології ґрунтів.

8. Сформульовано та представлено вирішення оптимізаційної задачі вибору структури автономного електрогенеруючого комплексу з відновлюваними джерелами енергії для станцій катодного захисту. Обґрунтовані важливі енергетичні критерії прийняття рішення за показниками надійності, якості електроенергії та мінімуму загальних витрат. Даний алгоритм дозволяє обрати оптимальний варіант при компромісних взаємовиключних рішеннях за різних умов інсоляції, сили вітру та вартості логістичних перевезень для регіонів України.

Практична цінність роботи полягає у:

- обґрунтуванні уточненого розрахункового співвідношення для визначення параметрів схеми заміщення металевої конструкції при дослідженні режимів електротехнічної системи катодного захисту;
- створенні методики, алгоритму та програмного забезпечення для моделювання розподілу захисного потенціалу вздовж підземного металевого трубопроводу;
- розробці рекомендацій щодо вибору комплексного джерела електропостачання з відновлюваним джерелами енергії при врахуванні ймовірнісних характеристик зміни навантаження;
- обґрунтуванні впливу спектрального складу вихідного струму станцій катодного захисту на ефективність захисту;
- розробці технічного рішення з вибору типу та потужності фотоелектричних модулів та/або вітроенергетичної установки за географічним розташуванням об'єкту захисту.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи Миколи Бабенка підтверджується актами впровадження АТ «Нікопольський завод феросплавів», ТОВ «KITBIC» та у навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Загальна характеристика структури і змісту роботи

Дисертація представлена на рецензування складається з анотації двома мовами, змісту, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох

розділів, висновків, списку використаних джерел на 115 пунктів, додатків. Обсяг дисертації складає 178 сторінок.

Перший розділ роботи присвячений аналізу стану проблематики електрохімічної корозії підземних сталевих конструкцій, проаналізовано типові рішення для захисту. Дослідження електрохімічної корозії показують, що єдиного підходу до вибору параметрів станцій катодного захисту, особливо при паралельній роботі групи активних станцій, на сьогодні не сформовано. Сформульовані ідея, мета роботи та перелік завдань дисертаційного дослідження.

У *другому розділі* отримано нові залежності для визначення рівнів захисного потенціалу системи захисту від електрохімічної корозії, як функції часу та координати відстані трубопроводу. При цьому враховано реальні геометричні розміри конструкції, параметри ґрунтів, наявності полімерних вставок для з'єднання секцій трубопроводів, якісних показників ізоляції та параметрів вентильних перетворювачів станцій катодного захисту.

Досліджено джерела блукаючих струмів та зовнішні фактори впливу на змінну складову захисного потенціалу. Розроблена модель у MATLAB/Simulink дозволяє моделювати значення наведених потенціалів при перетині траси газогону та високовольтної лінії електропередачі. Визначними особливостями моделі є врахування кута перетину, що дає можливість мінімізувати негативний вплив зовнішніх інженерних мереж на ефективність системи захисту.

У *третьому розділі* отримано аналітичні залежності енергетичних коефіцієнтів при різних умовах живлення станцій захисту у несиметричному режимі від централізованих систем ослабленої потужності у віддалених районах електричних мереж та/або при острівних режимах живлення, виконано аналіз складових повної потужності та отримано залежності, які дозволяють визначити електричні режими з найбільшою енергетичною ефективністю з точки зору перетікань реактивної потужності та емісії вищих гармонік до електричної мережі.

Моделювання рівні вищих гармонік струму та напруги при роботі випрямлячів та інверторів проводилось для різних схемних топологій вентильних перетворювачів.

У четвертому розділі в середовищі MATLAB/Simulink були розроблені моделі мережі з розподіленою генерацією, що включає в себе споживача у вигляді станції катодного захисту з повною потужністю 3 кВА, а також сонячні та вітрові електростанції малої потужності генерації (3 кВт та 5 кВт). Для моделювання використовувалися реальні набори даних з навантаженням та генерацією електроенергії, а також метеопараметри (швидкість вітру та рівень сонячної інсоляції), відповідно до пори року.

У програмному середовищі HelioScope виконано моделювання складу та електричних режимів генерації та енергетичної ефективності гібридної сонячної електростанції потужністю 3 кВт для умов розташування у трьох регіонів України.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. Основні положення та результати дисертаційної роботи Миколи Бабенка опубліковано у 10 наукових публікаціях, з яких 3 статті у наукових фахових виданнях України, 4 статті проіндексовано у міжнародній наукометричній базі даних Scopus, взята участь у двох міжнародних наукових конференціях, отримано один патент на корисну модель.

Академічна доброчесність. Порухень академічної доброчесності в дисертаційній роботі та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Запозичення, що виявлені у наданій на рецензування роботі, оформлені у відповідному порядку, а саме містять коректні посилання на дослідження інших авторів, і не мають ознак плагіату.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків здобувача.

Зауваження та дискусійні питання дисертаційної роботи.

1. На рис. 2.5 – 2.7 наведені графіки зміни захисного потенціалу підземного трубопроводу, проте автор не наводить умов проведення вимірювань та обладнання, яке при цьому використовувалося. Також залишається незрозумілим, яким чином по часовим залежностям виконано оцінку «широти спектру сигналу».

2. У п. 2.3 (рис. 2.9) представлена модель трубопроводу з пристроєм катодного захисту, яка являє собою модель з розподіленими параметрами. Проте у тексті роботи недостатньо уваги приділено обґрунтуванню розділення захисту на зони по 500 метрів. Що саме така відстань дозволяє врахувати або, навпаки, чим знехтувати? Автор не наводить налаштувань моделі у MATLAB/Simulink: методу рішення диференціальних рівнянь (Solver), кроку обчислень (Step Size), тощо.

3. У тексті роботи відсутнє пояснення ефекту, який продемонстрований на рис. 2.16, що приблизно в середині трубопроводу напруга на трубі знижується нижче порогового значення в 15 В, а потім знову зростає вище нього, а потім знову починає спадати. У цілому пояснення до рис. 2.16 не наведено.

4. З тексту роботи залишається незрозумілим на чому ґрунтується твердження «у разі перетинання трубопроводом простору під повітряною лінією, необхідно здійснювати цей перетин бажано кутом, наближеним до прямого» (С. 104), так як дослідження впливу кута розміщення трубопроводу відносно лінії електропередачі на індуковану напругу не наведено. Було вказано, що моделювання здійснюється при куті $\beta=45^\circ$, без додаткових пояснень.

5. У п. 3.5 автором проводилось моделювання режимів роботи керованих і некерованих перетворювачів станцій катодного захисту, проте в результаті не визначено, який саме варіант системи живлення рекомендується до застосування.

6. З тексту роботи не зрозуміло, чому для живлення катодного захисту трубопроводу було обрано гібридну структуру електростанції з фотоелектричними перетворювачами та вітрогенеруючими установками, модель якої була розроблена у п. 4.3.

7. У п. 4.6 запропонований метод багатокритеріальної оптимізації структури гібридної електростанції для живлення станції катодного захисту трубопроводу, проте не представлені результати його роботи, не виконано оцінку його ефективності та не проведено порівняльного аналізу з іншими методами.

8. У тексті роботи не наведено результатів порівняння застосування запропонованої гібридної електростанції для живлення станції катодного захисту з іншими варіантами електропостачання, як-то від централізованої електричної мережі тощо.

9. Підписи на вісях окремих рисунків виконані англійською мовою, інших українською. Бажано було б дотримуватись одного стилю оформлення.

10. У тексті роботи присутні помилки та неточності. Наприклад, відсутнє посилання джерело та опис рис. 1.20. На С. 88 наводиться посилання на рис. 2.4, а у тексті описується рис. 2.7. У підписі до рис. 2.9 текст «кіс» замість «кіл», тощо.

Зазначені недоліки і зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Миколи Бабенка, її наукову новизну і практичну цінність.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертація Бабенка Миколи Володимировича «Енергоефективна електротехнічна система катодного захисту підземного сталевих трубопроводу» є закінченою науковою роботою, в якій представлені науково-обґрунтовані теоретичні положення і технічні рішення направлені на розв'язок завдання підвищення енергетичної ефективності та надійності систем захисту трубопроводів від електрохімічної корозії. Отриманні

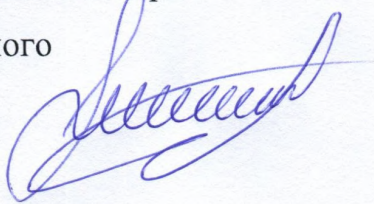
залежності, моделі і методи мають суттєве значення для науки та практики. Достовірність і обґрунтованість висновків і рекомендацій, наукова та практична цінність дослідження свідчать про достатню для присудження наукового ступеня доктора філософії кваліфікацію автора.

Матеріали дисертаційного дослідження викладено у чіткій логічній послідовності з дотриманням наукового стилю. Отримані результати достатньо повно опубліковані у наукових печатних і електронних виданнях. Кількість статей відповідає нормам наказу МОН України «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук» (№1220 від 23.09.2019 із змінами № 285 від 08.03.2024), включаючи публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз.

Дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (затв. постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р. із змінами №507 від 03.05.2024), а її автор – Бабенко Микола Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

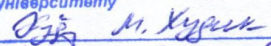
Офіційний опонент,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електричної інженерії
Криворізького національного
університету



Олексій МИХАЙЛЕНКО



Підпис	
ЗАСВІДЧУЮ:	
Учений секретар Криворізького національного університету	
	
«16» 02 2026 р.	