

РЕЦЕНЗІЯ

доцента кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій
Національного університету біоресурсів і природокористування України,
кандидата технічних наук, доцента **ЧУЄНКА Романа Миколайовича**
на дисертацію **БАБАКА Дениса Олеговича**
на тему: **«Електротехнічний комплекс моніторингу
та регулювання режиму роботи біогазового реактора»**,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
галузі знань 14 «Електрична інженерія»

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми дослідження зумовлений необхідністю підвищення ефективності біогазових установок, які є важливим складником відновлюваної енергетики та циркулярної економіки. Незважаючи на значний потенціал анаеробного зброджування органічних відходів, продуктивність сучасних біогазових реакторів часто обмежується недосконалістю систем нагрівання, перемішування та моніторингу технологічних параметрів. Нерівномірний розподіл температури, утворення застійних зон і недостатня інформативність засобів контролю призводять до зниження виходу біогазу та збільшення енерговитрат. У зв'язку з цим актуальним є розроблення інтегрованого електротехнічного комплексу, здатного поєднати функції перемішування, нагрівання, моніторингу та автоматичного керування процесом анаеробного бродіння. Реалізація такого підходу сприятиме підвищенню енергоефективності біогазових установок, стабільності технологічного процесу та рентабельності виробництва біогазу.

Тема дослідження узгоджується з державними пріоритетами України у сфері енергетики, енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії. Робота спрямована на підвищення ефективності біогазових установок шляхом удосконалення процесів моніторингу та керування анаеробним бродінням, що відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки України «Енергетика та енергоефективність». Крім того, результати дослідження сприяють реалізації положень Енергетичної стратегії України щодо зменшення залежності від викопних палив, розвитку біоенергетики, підвищення рівня енергетичної безпеки держави та ефективного використання відходів агропромислового комплексу. Розроблені технічні рішення також відповідають європейським підходам до декарбонізації економіки та розширення використання відновлюваних джерел енергії.

Ступінь обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. Дисертація характеризується системністю, логічністю викладу і чітким обґрунтуванням усіх етапів дослідження – від аналізу предметної області до апробації результатів.

Наукова новизна полягає у такому:

– вперше обґрунтовано концепцію та структуру інтегрованого електротехнічного комплексу, який об'єднує функції активного термомеханічного і магнітного впливу на субстрат і розподіленого інтелектуального моніторингу. На відміну від відомих аналогів, архітектура комплексу базується на синергетичному ефекті взаємодії трьох функціональних підсистем: заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача для генерації теплової енергії, створення гідродинамічних потоків і омагнічування субстрату; пристрою автоматичного вимірювання параметрів середовища та системи керування режимом роботи біогазового реактора, що забезпечує підвищення стабільності технологічних параметрів і енергоефективності біогазового реактора;

– дістала подальший розвиток система дистанційного моніторингу температурного стану і швидкості потоків субстрата у біореакторі шляхом застосування методу безконтактної передачі інформаційних сигналів від датчиків, розміщених на обертових елементах заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача як мобільної платформи для сканування об'єму реактора в агресивному середовищі, інтелектуального імпульсного алгоритму керування живленням, бінарного протоколу обміну, алгоритму циклічного надлишкового коду, що зводить до мінімуму паразитне тепловиділення, забезпечивши високу метрологічну чистоту сигналів, підвищує надійність системи та точність контролю температури в ядрі біореактора;

– удосконалено математичну модель поліфункціонального електромеханічного перетворювача, в якій навантажувально-охолоджуюче середовище (субстрат) представлено як елемент ПЕМП і включено у розрахункову область з урахуванням в моделі вектора густини поляризації, куди входить весь індукований струм, і вектора намагніченості середовища, а залежності параметрів для феромагнітних та провідних середовищ від просторових координат представлені матрицями електропровідності та магнітної проникності, що дало змогу встановити параметри електромагнітного впливу на субстрат і уточнити просторовий розподіл електромагнітних навантажень;

– вперше експериментально досліджено динамічні властивості заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача зі складної геометричної форми виконавчої частини у в'язкому неньютонівському середовищі в умовах вимушеної конвекції, що дозволило оптимізувати питоме теплове навантаження поверхні та запобігти термічного шоку бактерій та налипання субстрату (коксування);

– вперше за допомогою запропонованої кінцево-елементної математичної моделі обертового трансформатора для безконтактного передавання енергії в системі моніторингу технологічних параметрів встановлено закономірності розподілу магнітної індукції в зоні розташування обертового трансформатора та його динамічні властивості із аксіальним розміщенням обмоток та використанням вхідного П-подібного сигналу частотою від 1,5 до 7 кГц.

Викладені положення підтверджуються результатами експериментальних досліджень, апробацією на міжнародних конференціях («Цифрові технології в енергетиці і автоматичі», «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA'2025) тощо) та публікаціями у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, та у виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України.

Значення одержаних результатів для науки й практики та рекомендацій щодо їх можливого використання. Одержані результати мають важливе значення для розвитку електротехнічних засобів автоматизації біогазових установок та теорії поліфункціональних електромеханічних перетворювачів. У роботі обґрунтовано принципи побудови інтегрованого електротехнічного комплексу, розроблено математичні моделі електромагнітних, теплових і гідродинамічних процесів у біореакторі, а також удосконалено методи дистанційного моніторингу параметрів анаеробного бродіння. Отримані результати розширюють наукові уявлення про закономірності функціонування заглибних електромеханічних систем у біотехнологічних процесах.

Практичне значення роботи полягає у створенні експериментального зразка електротехнічного комплексу та пристрою автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння, що забезпечують підвищення енергетичної ефективності біогазових установок, стабілізацію технологічних режимів і збільшення виходу біогазу. Результати дослідження

доцільно використовувати під час проєктування, модернізації та експлуатації біогазових комплексів, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти за спеціальностями електротехнічного та енергетичного профілю.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення. Дисертація Д. О. Бабака є цілісним, логічно побудованим і завершеним науковим дослідженням, виконаним на належному теоретичному та методологічному рівні. Робота характеризується чіткою внутрішньою структурою, послідовністю викладу матеріалу та обґрунтованістю отриманих наукових результатів. Усі розділи дисертації взаємопов'язані та підпорядковані досягненню поставленої мети дослідження.

У дисертації викладено теоретичні засади побудови електротехнічних комплексів, які поєднують функції перемішування, нагрівання, моніторингу технологічних параметрів та керування режимами роботи біогазового реактора, наведено результати експериментальної перевірки ефективності запропонованих рішень та сформульовано практичні рекомендації щодо їх використання.

Структура дисертації повністю відповідає меті, завданням, об'єкту та предмету дослідження. У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, окреслено об'єкт, предмет і методи, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Також наведено відомості про апробацію результатів, публікаційну активність здобувача та структуру дисертації, яка складається з чотирьох розділів, висновків і додатків.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану розвитку біогазових технологій, розглянуто існуючі методи забезпечення температурного режиму та перемішування субстрату в біогазових реакторах, виконано огляд конструкцій заглибних електромеханічних перетворювачів, систем моніторингу й автоматичного керування параметрами анаеробного бродіння. Також проаналізовано науково-технічну та патентну літературу за напрямом автоматизації біогазових комплексів, виявлено основні недоліки традиційних систем нагрівання, перемішування та контролю параметрів біореактора, що дозволило обґрунтувати необхідність розроблення інтегрованого електротехнічного комплексу для моніторингу та регулювання режимів роботи біогазової установки.

У **другому розділі** обґрунтовано концепцію побудови електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режимів роботи біогазового реактора, розроблено конструкцію і принцип дії заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача, що поєднує функції перемішування, нагрівання та омагнічування субстрату. Виконано математичне моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів у перетворювачі, досліджено магнітне поле нагрівального кабелю, розроблено апаратно-програмний комплекс керування та збору даних з обертових частин ПЕМП, а також систему безконтактного живлення і передачі інформації на основі обертового трансформатора. Крім того, проведено моделювання та експериментальні дослідження обертового трансформатора і динамічних режимів роботи системи моніторингу, що дозволило обґрунтувати параметри та структуру розробленого електротехнічного комплексу.

У **третьому розділі** розроблено та досліджено пристрій автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння, обґрунтовано його структурну та функціональну схеми, виконано моделювання процесів самоочищення сенсорів і гідродинаміки потоків промивної рідини за допомогою CFD-аналізу. Розглянуто питання вибору та інтеграції датчиків температури, кислотності, окисно-відновного потенціалу та рівня рідини, розроблено систему збору, обробки й передачі даних на базі мікроконтролерних засобів, а також досліджено режими роботи виконавчих механізмів і системи автоматизованого

керування. Особливу увагу приділено підвищенню точності моніторингу технологічних параметрів, забезпеченню надійності функціонування сенсорної системи в агресивному середовищі біореактора та інтеграції пристрою в загальну систему керування біогазовою установкою.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень розробленого електротехнічного комплексу та його основних функціональних вузлів у різних режимах роботи. Досліджено електромеханічні, теплові та енергетичні характеристики заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача, виконано оцінювання ефективності систем нагрівання, перемішування та моніторингу параметрів анаеробного бродіння. Проведено перевірку адекватності математичних моделей, визначено вплив способів регулювання на енергоспоживання та динамічні характеристики ПЕМП, досліджено роботу системи збору даних і вимірювальних каналів, а також підтверджено працездатність і ефективність запропонованих технічних рішень щодо підвищення енергоефективності та стабільності функціонування біогазового реактора.

У **висновках** узагальнено результати теоретичних та експериментальних досліджень, підтверджено досягнення поставленої мети щодо розроблення електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режимів роботи біогазового реактора, сформульовано основні наукові та практичні результати роботи. Наведено положення наукової новизни, що стосуються створення інтегрованого комплексу на базі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача, удосконалення математичних моделей, системи дистанційного моніторингу та безконтактної передачі енергії й інформації. Також обґрунтовано практичну цінність розроблених технічних рішень, підтверджено можливість зниження енерговитрат біогазової установки, підвищення точності контролю параметрів процесу анаеробного бродіння та ефективності функціонування біогазових реакторів.

Дисертація написана грамотною, чіткою та науково виваженою українською мовою. Виклад матеріалу відзначається логічною послідовністю, структурною узгодженістю та коректним використанням спеціалізованої термінології у сфері електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Текст роботи легко сприймається, у ньому відсутні надмірні узагальнення або стилістичні помилки, а аргументація побудована на достовірних наукових фактах і результатах експериментів.

Дисертація оформлена відповідно до вимог МОН України та повністю відповідає принципам академічної доброчесності. У тексті відсутні ознаки плагиату, компіляції чи недобросовісного запозичення; усі використані джерела коректно процитовано. Стиль викладу відзначається науковою точністю, логічністю та послідовністю. Отже, робота характеризується завершеністю, високою культурою наукового викладу й відповідає критеріям кваліфікаційної праці на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано відповідно до планів науково-дослідницької роботи Національного університету біоресурсів і природокористування за темами «Розробка електротехнологічного комплексу з гібридною системою енергозабезпечення для переробки побічних продуктів птахівництва у паливо, біологічні корми та добрива» (номер державної реєстрації 0120U102105) та «Розробка електротехнології підготовки та спалювання паливних сумішей з утилізованою водою та рідинними відходами різного походження» (номер державної реєстрації 0123U102165).

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації. Основні положення та результати

дисертаційного дослідження викладено в 11 наукових працях, з яких 2 статті у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 2 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 4 тези наукових доповідей, патент України на корисну модель. Вказані публікації чітко та цілком відображають основні наукові положення та досягнення проведеного дисертаційного дослідження.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності. Дисертація є самостійно написаною кваліфікаційною науковою працею із науково обґрунтованими висновками та рекомендаціями, які подано автором для публічного захисту. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела. У роботі відсутнє привласнення чужих ідей, результатів або слів без оформлення належного цитування. Таким чином, у дисертаційному дослідженні Д. О. Бабака відсутні порушення академічної доброчесності.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертації. Дисертація здобувача Д. О. Бабака виконана на високому науково-технічному рівні, відповідає спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», має завершений характер і містить практичну реалізацію електротехнічного комплексу, який поєднує функції перемішування, нагрівання, моніторингу технологічних параметрів та керування режимами роботи біогазового реактора. Водночас, у роботі наявні окремі зауваження та дискусійні положення, які мають рекомендаційний характер і не знижують загальної наукової та практичної цінності дослідження. До таких зауважень і питань для наукової дискусії можна віднести наступні:

1. Математична модель технологічного середовища побудована з використанням усереднених фізичних параметрів субстрату, тоді як у реальному процесі анаеробного бродіння склад, густина, вологість, електричні та магнітні властивості середовища суттєво змінюються в часі.

2. CFD-модель системи очищення побудована для середовища «вода-повітря», тоді як реальні умови роботи характеризуються наявністю біоплівки різного складу та адгезійних властивостей. Тому ефективність очищення може відрізнятися від отриманих розрахункових результатів.

3. У роботі зафіксовано наявність електромагнітних завад, які призводили до втрати даних окремих датчиків температури, що свідчить про необхідність подальшого вдосконалення системи телеметрії та завадозахищеності каналів зв'язку.

4. Вибір мікроконтролерної платформи (наприклад, ESP32) та радіомодулів для системи вимірювання обґрунтовано з точки зору їхньої доступності, енергоефективності та функціональності. Проте в роботі бракує порівняльного аналізу їхньої надійності, відмовостійкості та електромагнітної сумісності з промисловими програмованими логічними контролерами (ПЛК), які є стандартом для автоматизації реальних біогазових станцій.

5. Розроблений пристрій для автоматичного контролю параметрів, що містить кроковий двигун та рухома каретку, працює в умовах агресивного середовища, схильного до закоксування. У роботі не повною мірою розкрито алгоритм дій автоматики (зокрема, обробку сигналів з енкодера) у нештатних ситуаціях, наприклад, у випадку механічного заклинювання направляючих під час опускання чи підйому сенсорного блоку.

Зазначені зауваження мають рекомендаційний і дискусійний характер та можуть бути враховані при подальшому розвитку теми дослідження. Вони не знижують наукової новизни, практичної значущості та загального позитивного враження від дисертації. Наукова робота Д. О. Бабака відповідає вимогам, що висуваються до кваліфікаційних наукових праць

на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Загальний висновок. Вважаю, що дисертація на тему: «Електротехнічний комплекс моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого вирішує наукове завдання, що має істотне значення для галузі електричної інженерії. Ураховуючи актуальність, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, можна стверджувати, що дисертація повністю відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року (зі змінами), а її автор Бабак Денис Олегович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія».

Рецензент доцент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України, кандидат технічних наук, доцент Роман ЧУЄНКО