

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу **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»

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку відновлюваної енергетики вимагає впровадження високоефективних та надійних електромеханічних систем для забезпечення стабільної роботи автономних енергоустановок, біогазових реакторів тощо. В умовах необхідності підвищення продуктивності біоенергетичних комплексів на перший план виходить проблема оптимізації процесів електромеханічного перетворення енергії. Традиційні підходи до перемішування та нагріву біомаси супроводжуються значними втратами енергії та низьким коефіцієнтом корисної дії, що зумовлює нагальну потребу в розробленні спеціалізованих заглибних електромеханічних перетворювачів із розширеними функціональними можливостями.

Вирішення проблеми підвищення енергоефективності біогазових технологій неможливе без адекватних математичних моделей для розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів у нестандартних електричних машинах. Оскільки робоче середовище реактора є складною неньютонівською рідиною, інтеграція навантажувально-охолоджувального середовища безпосередньо в розрахункову область магнітного поля становить складне та нетривіальне наукове завдання. Застосування масивних феромагнітних роторів як генераторів теплової енергії потребує детального дослідження просторово-часового розподілу вихрових струмів та глибокої оптимізації конструктивних параметрів машини.

Особливої актуальності набувають питання розроблення надійних систем керування такими електромеханічними комплексами. Впровадження напівпровідникових (вентильних) перетворювачів, зокрема симісторних регуляторів напруги, дозволяє гнучко керувати режимами роботи заглибної електричної машини. Це забезпечує точне дозування теплової та механічної енергії, що передається субстрату, та сприяє створенню оптимальних умов для метаногенезу. Разом із тим використання вентильних комутаторів вимагає вирішення проблеми електромагнітної сумісності та надійності функціонування систем безконтактної передачі енергії й дистанційного моніторингу в умовах інтенсивних електромагнітних завад.

З огляду на вищезазначене, дисертаційне дослідження, яке присвячене створенню та комплексному аналізу електротехнічного комплексу на базі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача, є своєчасним і науково обґрунтованим. Отримані результати мають вагоме значення для розвитку теорії і практики спеціальних електричних машин та підвищення ефективності систем автономної генерації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційному дослідженні Бабака Дениса Олеговича, характеризуються високим рівнем достовірності та внутрішньою логічною узгодженістю. Здобувачем правильно визначено мету та завдання дослідження, а для їх виконання застосовано коректний і сучасний математичний та інструментальний апарат, що відповідає провідним тенденціям розвитку теорії спеціальних електричних машин і напівпровідникової перетворювальної техніки.

Теоретичні положення дисертації ґрунтуються на фундаментальних законах електротехніки, теорії електромагнітного поля (системи рівнянь Максвелла) та теорії автоматичного керування. Високий ступінь обґрунтованості демонструє 3D-математична модель заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП) у середовищі Comsol Multiphysics. Інноваційним кроком є включення самого біогазового субстрату в розрахункову область моделі з урахуванням векторів густини поляризації та намагніченості середовища. Це дозволило з високою точністю дослідити просторово-часовий розподіл вихрових струмів (струмів Фуко) у масивному феромагнітному роторі та оцінити електромагнітний момент машини (на рівні 6,5-7 Н·м).

Методичні та практичні рішення здобувача щодо створення системи безконтактної передачі енергії на базі обертового трансформатора є глибоко аргументованими. Дослідження динамічних властивостей повітряного трансформатора на високих частотах (до 7 кГц) дозволило автору оптимізувати його конструкцію, забезпечивши стабільне живлення вимірювальних кіл ротора (з коефіцієнтом передачі напруги 0,74) в умовах електромагнітних завад і повної гальванічної ізоляції.

Достовірність отриманих експериментальних результатів підкріплюється створенням повноцінного фізичного макета електротехнічного комплексу. Особливої уваги заслуговує розробка автором трифазного симісторного регулятора напруги на базі мікроконтролера ESP32-S2. Автором ґрунтовно досліджено процеси асиметрії фазового керування індуктивним навантаженням та успішно вирішено проблему магнітного насичення статора шляхом модернізації системи детектування нуля (застосування двоспрямованих оптопар FOD814A).

Отримані експериментальні дані щодо енергетичного балансу ПЕМП підтверджують, що

загальний ККД розробленої електромеханічної системи сягає 99%, оскільки всі електричні та магнітні втрати трансформуються в цільовий нагрів субстрату. Збіжність результатів чисельного моделювання з експериментальними вимірюваннями беззаперечно підтверджує достовірність і високу наукову обґрунтованість сформульованих у дисертації висновків та рекомендацій.

Новизна основних наукових положень, висновків і рекомендацій. До найбільш важливих наукових положень, висновків і рекомендацій, які відзначаються новизною, науковою і практичною цінністю в галузі електричної інженерії, слід віднести теоретичне обґрунтування концепції інтегрованого електротехнічного комплексу на базі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача. Здобувачем запропоновано розглядати його як обернену електричну машину змінного струму з масивним феромагнітним ротором, що одночасно виконує функції джерела теплової енергії за рахунок генерування струмів Фуко та створює необхідний крутний момент для перемішування.

Автором вперше запропоновано включити навантажувально-охолоджувальне середовище (субстрат) безпосередньо у розрахункову 3D-область з урахуванням векторів густини поляризації та намагніченості. При цьому фізичні параметри провідних гетерогенних середовищ подано матрицями електропровідності та магнітної проникності, що суттєво підвищило точність розрахунку електромагнітного моменту.

Важливим науковим здобутком є визначення енергетичних характеристик та динамічних властивостей обертового трансформатора у складі заглибного перетворювача залежно від величини осевого зазору між обмотками. Здобувачем обґрунтовано вибір робочої частоти широтно-імпульсного сигналу з урахуванням полів розсіювання лобових частин обмотки статора. Це дозволило створити надійну систему безконтактної передачі енергії на ротор для живлення вимірювальних кіл телеметрії.

Окремий науковий інтерес становить експериментальне визначення властивостей перетворювача для трьох варіантів живлення, включаючи розроблений мікропроцесорний трифазний симісторний регулятор напруги. У роботі успішно вирішено проблему магнітного насичення статора при фазовому регулюванні індуктивного навантаження шляхом застосування двоспрямованих оптопар для ідеально симетричного детектування нуля напруги мережі. Наведені обґрунтування, графічні залежності та результати моделювання переконливо підтверджують високий рівень достовірності винесених на захист елементів наукової новизни.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження Бабака Д. О. є невід'ємною складовою комплексних науково-дослідних робіт кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету

біоресурсів і природокористування України та цілком узгоджується з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки «Енергетика та енергоефективність». Робота виконувалася в межах державних наукових тем: «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).

З точки зору розвитку електромеханіки та автономних енергоустановок, зміст дисертації конкретизує та успішно реалізує інженерні завдання зазначених державних програм. Особистий внесок здобувача у виконання цих тем полягає в теоретичному обґрунтуванні та розробці безпосередньо апаратного забезпечення – високоефективного електротехнічного комплексу на базі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача, необхідного для практичної реалізації гібридних систем енергозабезпечення на реальних біогазових станціях. Отримані результати також повністю корелюють зі стратегічними цілями «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» у частині заміщення природного газу альтернативними видами палива. Це засвідчує глибокий логічний зв'язок дисертації з актуальними завданнями сучасної електроенергетичної науки та практики.

Практичне значення та впровадження результатів дослідження. Під час виконання дисертаційної роботи здобувачем Бабаком Д. О. отримано вагомі прикладні результати, які формують методичний і технологічний базис для створення нового класу високоефективних електромеханічних систем для автономної енергетики. Запропоновані автором інженерні рішення дозволяють проєктувати поліфункціональні електромеханічні перетворювачі (ПЕМП) із заданими енергетичними характеристиками для роботи в агресивних гетерогенних середовищах.

Практичну значущість дисертації забезпечують розроблені та апробовані апаратно-програмні комплекси, серед яких ключове місце посідає трифазний мікропроцесорний симісторний регулятор напруги (на базі ESP32-S2), що забезпечує симетричне фазове керування та усуває проблему магнітного насичення статора. Розроблена автором система безконтактної передачі енергії та даних (через обертовий трансформатор і захищений радіоканал JDY-40) успішно вирішує проблему телеметрії з рухомих частин електромеханічного обладнання без використання контактних кілець.

Додатковим свідченням прикладної цінності є розроблене програмне забезпечення: мікропрограми для роботи обертового вузла ПЕМП та симісторного регулятора напруги, а також програма функціонування експериментального стенда. Впровадження розробленого

електротехнічного комплексу дозволяє знизити споживання електроенергії на власні потреби біогазових установок на 10-15 %. Крім того, інженерні рішення щодо системи автоматичного очищення датчиків підтверджені патентом України на корисну модель № 155766.

Таким чином, результати дослідження мають виражену практичну спрямованість і можуть бути широко впроваджені для підвищення ефективності електромеханічного обладнання у відновлюваній енергетиці.

Повнота викладення основних наукових результатів в опублікованих працях.

Основні наукові результати дисертаційного дослідження Д. О. Бабака достатньо повно відображено у 9 наукових працях. З них 2 статті опубліковано у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, 2 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 4 тези наукових доповідей та отримано 1 патент України на корисну модель. У статтях і тезах доповідей автором послідовно розкрито концепцію побудови електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора, а також результати дослідження обертового трансформатора у складі цієї системи. Апробація результатів дослідження на профільних наукових заходах, зокрема на Міжнародному симпозіумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA'2025), підтверджує їх високий фаховий рівень. Наведене засвідчує повноту розкриття теми дисертаційного дослідження в опублікованих працях та відповідність публікаційної активності здобувача чинним нормативним вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності. Проведеним ретельним вивченням дисертації, а також опрацюванням наукових публікацій, у яких висвітлено основні результати дослідження Бабака Дениса Олеговича, не встановлено жодних порушень академічної доброчесності. Дисертація є самостійною й оригінальною науковою працею. Аналітичні розрахунки, математичні та кінцево-елементні моделі електромагнітних процесів, а також осцилограми та результати тестування апаратних і програмних рішень (зокрема, симісторного регулятора та системи безконтактної передачі енергії) розроблено та отримано автором особисто. Усі запозичені твердження, математичні залежності та цитати в основному мають відповідні посилання на першоджерела. Текст роботи написано з належним використанням термінологічного апарату електричної інженерії та електромеханіки, що підтверджує високий рівень культури наукового викладу та суворе дотримання законодавства у сфері авторського права.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертації.

1. Висновок 1 першого розділу акцентує увагу (автором встановлено), що

ефективність біогазових технологій стримується недосконалістю методів забезпечення температурного і гідродинамічного режимів у реактора. Це відомо, тому не потребує встановлення.

2. В п.2 наукової новизни одержаних результатів вказується на вдосконалення математичної моделі силової частини електромагнітної системи, а в п.2 загальних висновків на розробку математичних моделей ПЕМП. Однак у роботі використовуються стандартні програми для комп'ютерного моделювання.

3. У більшості випадків відсутнє пояснення, яким чином використовуються при дослідженнях наведені у роботі формули. Результати отримані з використанням стандартних програм.

4. В п.4 наукової новизни використана не зовсім вірна термінологія «...обґрунтовано вибір робочої частоти ШІМ-сигналу прямокутної форми системи живлення...», а в розділі 1 вказано, що «для регулювання швидкості асинхронних двигунів широко використовується технологія ШІМ-перетворення частоти, але вихідна напруга та струм містять масу вищих гармонік...». Такі твердження є не зовсім коректні. Акцентується увага на «теорії втрат двигуна», «теорії додаткових втрат». Така термінологія зазвичай не використовується.

5. На рис. 3.3 представлено результати моделювання і експериментальних досліджень розподілення струменів і форми конуса розбризкування рідини. Яким чином результати моделювання демонструють високу точність і надійність математичної моделі?

6. Викликають сумнів середні відхилення між результатами моделювання магнітного поля лопаті та експериментом, які не більше 6%, що пов'язано з використанням при експериментальному дослідженні вимірювача магнітного поля. Magnetic Field Meter TM-191 (підрозділ 2.5).

7. Підрозділ 4.6 доцільно було б винести у додатки.

8. Деякі рисунки розділів потребують більш детального аналізу (наприклад, рис. 2.5, 2.6 тощо).

9. Мають місце орфографічні помилки і неточності.

Загальний висновок. Дисертаційне дослідження Бабака Дениса Олеговича «Електротехнічний комплекс моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яку виконано на актуальну тему. У дисертації успішно вирішено конкретне наукове завдання, яке полягає у поглибленні теоретико-методичних засад та розробленні високоефективного заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача з інтегрованою системою безконтактного живлення і телеметрії на базі обертового трансформатора. Сформульовані в роботі наукові положення та апаратно-програмні рішення відзначаються науковою

новизною, глибокою аргументованістю та мають вагоме значення для розвитку теорії спеціальних електричних машин і систем автономної енергетики.

За змістом, обсягом, ступенем наукової новизни та практичною значущістю здобутих результатів дисертація відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) і 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. З огляду на зазначене, автор дисертації Бабак Денис Олегович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія».

Офіційний опонент:

завідувач відділу електромеханічних систем
Інституту електродинаміки НАН України
д-р техн. наук, професор

Леонід МАЗУРЕНКО