

**КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ МОНІТОРИНГУ
ТА РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА****М. М. Заблодський, доктор технічних наук, професор****Національний університет біоресурсів і природокористування України**<https://orcid.org/0000-0001-8889-8158>E-mail: zablodskiyyn@nubip.edu.ua**Д. О. Бабак, аспірант****Національний університет біоресурсів і природокористування України**<https://orcid.org/0009-0000-8970-8598>E-mail: denysbabak@nubip.edu.ua

Анотація. Стаття присвячена підвищенню ефективності експлуатації існуючих біогазових установок шляхом впровадження електротехнічного комплексу на базі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП). Мета дослідження – розробка концепції комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора. Комплекс поєднує активний термомеханічний й електромагнітний вплив на субстрат із розподіленим інтелектуальним моніторингом. Архітектура комплексу базується на синергетичній взаємодії двох функціональних підсистем: ПЕМП - виконавчий механізм, що розташовується безпосередньо у робочому об'ємі реактора та забезпечує одночасне перемішування, нагрівання, омагнічування субстрата, просторовий моніторинг температури, контроль частоти обертання та, при необхідності, інтенсивності магнітного поля в масиві зовнішнього ротора; пристрій для автоматичного контролю параметрів – вимірювальний модуль, що забезпечує періодичний високоточний контроль фізико-хімічних показників (рН, Redox, густина, вміст O₂, NH₃, H₂ тощо) з функцією автоматичного обслуговування (очищення та калібрування) сенсорів. Це дозволяє перейти до комплексного керування бродінням, де теплові та механічні потоки формуються адаптивно до стану середовища. Для оцінки динамічних властивостей обертового трансформатора проведено серію вимірювань на експериментальному зразку при зміні частоти вхідного П-подібного сигналу. Встановлено, що найбільш збалансованими виявилися показники при 2 кГц: достатня індукована напруга та помірний короткозамкнений струм. Перспективами розвитку передбачено зв'язок оцінки стану процесу метаногенеза не тільки через вплив на субстрат через зміну режимних параметрів всередині біореактора, але й з умовами впливу на режим попередньої обробки сировини (насамперед лігнінвмісної).

Ключові слова: заглибний поліфункціональний електромеханічний перетворювач, обертовий трансформатор, система безконтактної передачі енергії, моніторинг фізико-хімічних параметрів

Вступ. Сучасний етап розвитку світової енергетики характеризується глибинними трансформаційними процесами, спрямованими на перехід від традиційної вуглецевої економіки до сталого розвитку з використанням відновлюваних джерел енергії. В умовах перманентного зростання вартості викопних енергоносіїв, вичерпності нафтогазових родовищ та загострення глобальних екологічних проблем, пов'язаних із парниковим ефектом, розвиток біоенергетичних технологій набуває статусу пріоритетного завдання для багатьох країн світу, зокрема і для України [1].

Для агропромислового комплексу України, який генерує значні обсяги органічних відходів (гній тваринництва, послід птахівництва, рослинні залишки), технологія анаеробного зброджування є безальтернативним шляхом раціонального природокористування. Вона дозволяє вирішувати триєдину задачу: енергетичну (отримання біогазу для виробництва електроенергії та тепла), екологічну (утилізація екологічно небезпечних відходів, зменшення емісії метану в атмосферу) та агрохімічну (отримання високоякісних біодобрив – дігестату) [2, 3]. Проте, незважаючи на значний потенціал, реальна ефективність експлуатації існуючих біогазових установок (БГУ) часто залишається нижчою за розрахункову. Аналіз роботи промислових біореакторів свідчить, що лімітуючим

фактором продуктивності є не стільки біохімічний потенціал сировини, скільки недосконалість електротехнічних та теплотехнічних систем забезпечення технологічного процесу [4]. Процес метаногенезу здійснюється за допомогою анаеробних бактерій (гідролітичних, кислотоутворюючих, ацетогенних та метаногенних), життєдіяльність яких критично залежить від стабільності параметрів середовища існування. Навіть незначні коливання температури (в межах 1–2 °С для термофільного режиму) або недостатня гомогенність субстрату призводять до пригнічення мікрофлори, зниження виходу біогазу та, у критичних випадках, до повної зупинки реактора («закислення») [5].

Огляд літературних джерел. Існуючі інженерні рішення щодо систем перемішування та нагрівання мають низку суттєвих недоліків. Традиційні системи нагрівання, реалізовані у вигляді сорочок на корпусі реактора або внутрішніх трубчастих теплообмінників, характеризуються високою інерційністю та нерівномірністю температурного поля. У зонах безпосереднього контакту субстрату з теплообмінною поверхнею виникають локальні перегріву, що викликає термічний шок бактерій та налипання субстрату (коксування), тоді як у центральній частині великогабаритних реакторів спостерігаються зони недогріву [6].

Системи механічного перемішування, що базуються на використанні лопатевих, пропелерних або шнекових мішалок із довгими валами, є одними з найбільш енергоємних вузлів БГУ. Їх частка у загальному енергоспоживанні власних потреб станції може сягати 40–50 %. При цьому, гідродинамічна ефективність таких систем часто є недостатньою: у реакторах утворюються «мертві зони» (до 15–25 % робочого об'єму), де відсутній масообмін, накопичується осад на дні або формується щільна кірка на поверхні, що блокує вихід біогазу [7, 8]. Крім того, наявність рухомих частин, що проходять крізь стінку реактора, створює проблеми з герметизацією та витокami вибухонебезпечного метану. Одночасні вимірювання споживання електроенергії різними типами мішалок підтверджують, що використання похилої мішалки, що повільно обертається з великим діаметром лопатей замість швидко обертового занурювального міксера з меншим діаметром лопатей дозволяє досягти потенційної економії до 70% при збереженні якості перемішування.

Окремою, не менш гострою проблемою, є відсутність ефективних засобів поточного моніторингу параметрів середовища в об'ємі реактора. Більшість сучасних систем автоматизації спираються на покази датчиків, встановлених стаціонарно на стінках реактора або в трубопроводах подачі/відведення маси. Така інформація є інтегральною або граничною і не відображає реальної картини розподілу температурних та біохімічних полів всередині біомаси, яка є неньютонівською рідиною зі змінною в'язкістю [9,10]. Відсутність достовірних даних про стан субстрату в «ядрі» реактора унеможливує реалізацію адаптивних алгоритмів керування, які б дозволяли оптимізувати енерговитрати залежно від поточної стадії бродіння.

У роботах вітчизняних та закордонних вчених [11,12] вказується на перспективність використання заглибних електромеханічних перетворювачів, проте більшість досліджень фокусується на окремих аспектах (тільки перемішування або тільки нагрівання).

Комплексний підхід, який би поєднував активний гідродинамічний вплив, безпосереднє нагрівання субстрату в зоні перемішування та одночасний моніторинг параметрів у точці впливу, досі не знайшов широкого впровадження.

Як показав аналіз, традиційні підходи, що базуються на роздільному використанні систем механічного перемішування та зовнішнього обігріву, а також на локальному (точковому) моніторингу параметрів, вичерпали свій потенціал для подальшої інтенсифікації виробництва біогазу. Головними проблемами залишаються нерівномірність температурних та концентраційних полів у реакторі, наявність застійних зон, висока енергоємність обладнання та низька надійність контактних датчиків в умовах агресивного середовища.

Таким чином, розв'язання протиріччя між необхідністю забезпечення високої стабільності технологічних параметрів біогазового реактора та енергетичною неефективністю існуючих засобів їх підтримки вимагає створення нового класу обладнання. Розробка електротехнічного комплексу на базі заглибного поліфункціонального

перетворювача, здатного здійснювати моніторинг і керування режимами в реальному часі, є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить підвищити рентабельність виробництва біогазу.

Мета дослідження - розробка концепції побудови електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора.

Матеріали та методи дослідження. Технічна реалізація електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора на основі заглибного ПЕМП здійснена з використанням положень і методів теорії електричних машин, електропривода, основ перетворювальної техніки в частині забезпечення електромеханічних властивостей, теорій термодинаміки та гідродинаміки в частині забезпечення технологічних параметрів біогазового реактора, методів і технічних засобів обробки та передачі інформації та електронних комунікацій.

Електротехнічний комплекс розглядається як суміщена система, активне ядро якої може забезпечувати одночасне виконання трьох функціональних дій, необхідних для інтенсифікації виробництва біогазу, а також функції забезпечення дистанційного моніторингу енергетичних показників та теплового стану.

Системний метод передбачав комплексне уявлення про об'єкт дослідження як структуру, інтегровану у технологічне середовище біореактора, в якій усі елементи взаємопов'язані та взаємозалежні. У рамках системного аналізу були визначені ключові зв'язки між цими компонентами, що забезпечувало стабільність режиму та продуктивність біореактора. Використання цього методу дозволило виявити критичні фактори, що впливають на ефективність промислового масштабування та сформуванню узагальнену логічну модель взаємодії між компонентами інфраструктури.

Результати досліджень та їх обговорення. Запропонована концепція побудови інтегрованого електротехнічного комплексу, який об'єднує функції активного термомеханічного та електромагнітного впливу на субстрат та розподіленого інтелектуального моніторингу. Архітектура комплексу базується на синергетичній взаємодії двох функціональних підсистем (рис.1):

– заглибний поліфункціональний електромеханічний перетворювач (ЗПЕП), виконавчий механізм, що розташовується безпосередньо у робочому об'ємі реактора та забезпечує одночасне перемішування, нагрівання, омагнічування середовища (субстрата), просторовий моніторинг температури, контроль частоти обертання та, при необхідності, інтенсивності магнітного поля в масиві зовнішнього ротора;

– пристрій для автоматичного контролю параметрів (ПАК) – вимірювальний модуль, розташований на кришці реактора, що забезпечує періодичний високоточний контроль фізико-хімічних показників (рН, Redox, густина, вміст кисню, аміаку, водню тощо) з функцією автоматичного обслуговування (очищення та калібрування) сенсорів. Така структура дозволяє перейти від стабілізації окремих параметрів до комплексного керування режимом бродіння, де енергетичні потоки (теплові та механічні) формуються адаптивно до поточного стану біологічного середовища

До складу апаратної частини стенда входять наступні вузли (рис.1):

- *регульований електропривод.* При цьому можливе використання трьох варіантів живлення ЗПЕП: векторний перетворювач частоти серії SU-600 (керування здійснюється мікроконтролером через інтерфейс RS-485 за протоколом Modbus RTU); тиристорний регулятор напруги; трифазний автотрансформатор;

- *система вимірювання електричних параметрів* реалізована на базі спеціалізованих мікросхем PZEM-004T, що дозволяє в реальному часі контролювати напругу, струм, активну потужність, частоту та коефіцієнт потужності ($\cos \phi$) по кожній фазі окремо, враховуючи специфіку споживання ЗПЕП;

- *система безконтактної передачі енергії (СБПЕ).* Для живлення вимірювального модуля, розташованого на валу ротора, використано обертовий повітряний трансформатор

(Air Core Rotary Transformer). Первинна обмотка нерухома, вторинна — обертається разом з зовнішнім ротором;

вузол захисту та контролю фаз: реалізовано апаратний детектор наявності напруги на фазах L1, L2, L3 з використанням оптронів PC817A, що дозволяє мікроконтролеру миттєво реагувати на обрив фази та виконувати аварійну зупинку системи.

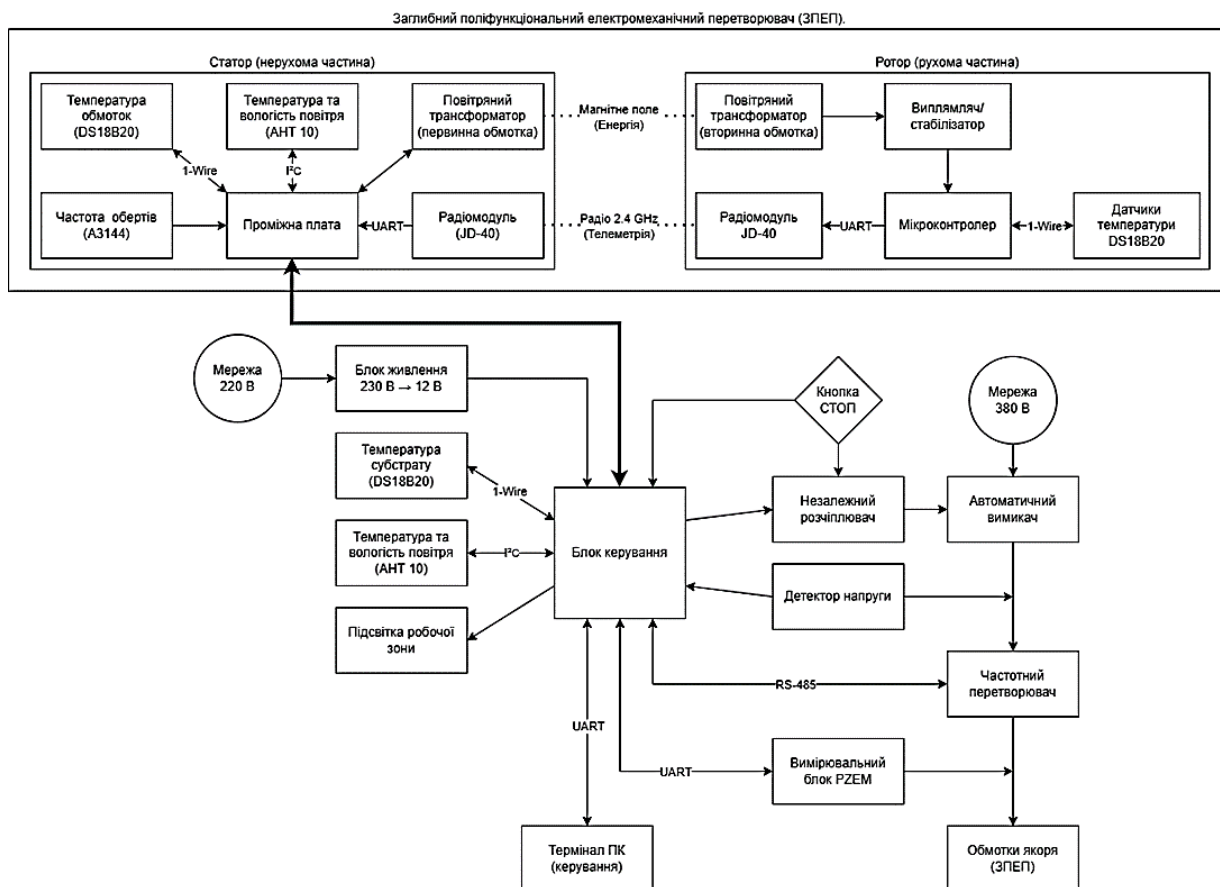


Рис.1. Структурна схема електротехнічного комплексу

Ключовою особливістю електротехнічного комплексу є організація телеметрії з рухомої частини. На етапі проєктування розглядався варіант використання трансиверів діапазону 433 МГц (ООК модуляція) через їх потенційно вищу енергоефективність. Однак, результати експериментальних досліджень в умовах реальної конструкції показали недостатню стабільність каналу зв'язку та низьку завадостійкість при роботі потужного силового перетворювача. У фінальній конфігурації стенда було використано радіо модуль JDY-40 (діапазон 2.4 ГГц), який забезпечив надійний двосторонній обмін даними з достатньою пропускну здатністю для передачі масиву температурних даних від 13 датчиків DS18B20.

Для програмної реалізації системи керування та збору даних розроблена мікропрограма для мікроконтролера ATmega328PB, яка базується на архітектурі поділу часу (Time-Division Multiplexing) без використання блокуючих затримок. Це забезпечує квазіпаралельне виконання задач моніторингу теплового стану, вимірювання електричних параметрів та керування частотним перетворювачем у реальному часі.

Алгоритм головного циклу реалізовано за принципом суперциклу з опитуванням прапорців станів та таймерів подій. Дискретність часу в системі забезпечується використанням системного таймера (millis()), що дозволяє формувати незалежні часові інтервали для різних підсистем згідно з налаштуваннями, що зберігаються в енергонезалежній пам'яті (EEPROM).

Моніторинг енергетичних характеристик ЗПЕП реалізовано через взаємодію з трьома модулями PZEM-004T v3.0, кожен з яких контролює окрему фазу живлення. Програмний модуль здійснює послідовне опитування датчиків через програмний UART, отримуючи масив даних: напруга (U), струм (I), активна потужність (P), частота (f) та коефіцієнт потужності ($\cos \phi$). В алгоритм закладено можливість програмної калібрування вимірних значень через калібрувальні коефіцієнти, що зберігаються в структурі налаштувань. Це дозволяє компенсувати похибки вимірювальних трансформаторів струму та подільників напруги без втручання в апаратну частину.

Специфіка реалізації теплового моніторингу полягає в тому, що система термометрії є дворівневою і включає статичну частину (корпус, вода, повітря) та динамічну частину (ротор). Для вимірювання температур статора та середовища використовується шина 1-Wire. Програмний модуль вимірювання температур реалізує машину станів, щоб уникнути блокування процесора на час конвертації температури датчиками DS18B20 (який може досягати 750 мс для 12-бітної точності). Динамічна термометрія ротора (імпульсний режим) через опитування датчиків, встановлених на обертовому роторі, вимагає керування живленням повітряного трансформатора для запобігання його перегріву, що є критичним для чистоти експерименту.

Вимірювання частоти обертання реалізовано методом вимірювання періоду слідування імпульсів від датчика Холла. Використовується зовнішнє переривання, яке фіксує час між фронтами імпульсів з мікросекундною точністю.

Дана реалізація дозволяє фіксувати миттєву швидкість обертання валу ЗПЕП, що необхідно для аналізу механічної характеристики приводу в умовах змінного в'язкого тертя біосубстрату.

Для забезпечення надійної передачі вимірювальних даних та команд керування між мікроконтролером (МК) стенда та ПК (терміналом на Python) розроблено власний бінарний протокол обміну. Вибір кастомного протоколу замість стандартних текстових (наприклад, JSON або CSV через UART) зумовлений необхідністю мінімізації накладних витрат на передачу (overhead) та жорсткими вимогами до часу обробки переривань у МК.

Враховуючи роботу стенда в умовах високого рівня електромагнітних завад від силового перетворювача частоти, критично важливим є захист даних від спотворень. Для цього додано алгоритм циклічного надлишкового коду CRC-8.

Розрахунок контрольної суми виконується поліноміальним методом (поліном $x^8 + x^5 + x^4 + 1$, представлення 0x8C). Функція `crc8` обробляє весь масив байтів структури (окрім останнього байта, де зберігається сама CRC). На стороні ПК (термінал Python) отриманий пакет вважається валідним лише за умови:

$$CRC_{received} = CRC_{cal}(Header + Timestamp + Payload) \quad (1)$$

Де: *Header* – заголовок; *Timestamp* – мітка часу; *Payload* – корисні дані.

Це гарантує, що помилкові дані, які можуть виникнути через іскріння контактів або комутаційні завади, будуть відфільтровані та не вплинуть на результати досліджень.

Складовими частинами загальної концепції побудови електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора, які конкретизують підходи до вирішення задач, є такі:

Підконцепція електротепломеханічного перетворення енергії в ЗПЕП. Ключовим елементом концепції є відмова від традиційних нагрівальних елементів (ТЕНів або теплообмінників) на користь генерації тепла безпосередньо в рухомому органі перемішувача. Для реалізації цього принципу обґрунтовано використання спеціалізованої електромеханічної системи, яка конструктивно являє собою обернену електричну машину змінного струму. Статорна обмотка розташована на нерухомому внутрішньому осерді, закріпленому на кришці реактора, а ротор виконано у вигляді порожнистої феромагнітної труби, що охоплює статор і обертається навколо нього. На зовнішній поверхні ротора закріплені лопаті для перемішування субстрату. Принцип дії такої системи базується на використанні втрат у сталі ротора як корисного джерела теплової енергії. Під дією змінного електромагнітного поля

статора в масивному тілі ротора індукуються потужні вихрові струми, які призводять до його нагрівання і одночасно при взаємодії з обертовим магнітним полем створюють електромагнітний момент. Особливістю даного підходу є наявність природного зворотного зв'язку між гідродинамічним опором середовища та інтенсивністю нагрівання. Зі збільшенням в'язкості субстрату (що характерно для його охолодження або завантаження свіжої сировини) зростає момент опору на лопатях, що призводить до збільшення ковзання ротора відносно поля статора. Це, у свою чергу, інтенсифікує протікання вихрових струмів та підвищує тепловиділення. Таким чином, система автоматично адаптує кількість генерованого тепла до змін реологічних властивостей середовища, забезпечуючи «нагрівання за потребою». Важливою перевагою такої концепції є відсутність локальних зон перегріву. Оскільки поверхня теплообміну (ротор) постійно рухається відносно рідини, забезпечується високий коефіцієнт тепловіддачі, що унеможливує пригорання (коагуляцію) біомаси на робочих органах, навіть при значних питомих теплових навантаженнях. Не менш важливою функцією ЗПЕП є вплив його зовнішнього магнітного поля на процеси метаногенезу через дію на бактеріальну спільноту та водну компоненту. Ефективність такої дії підтверджена рядом досліджень, зокрема в [13].

Щоб уникнути високих експлуатаційних витрат на чисту електроенергію, ЗПЕП інтегруються з рекуперацією відхідного тепла з когенераційних установок (ТЕЦ) або використовуються в менших портативних реакторах. Отже, ЗПЕП в частині регулювання температурного режиму біореактора в основному виконує функцію стабілізації цього режиму, тобто запобігає відхиленню температури субстрата від відповідного нормативного рівня мезофільного або термофільного режиму.

Підконцепція бездротового внутрішнього моніторингу. Другою функцією ЗПЕП є перетворення його на носій системи внутрішнього моніторингу. Традиційні датчики, встановлені на стінках реактора, не дають об'єктивної інформації про температуру в ядрі потоку. Розміщення датчиків температури безпосередньо на обертовому роторі дозволяє сканувати температурне поле в усьому об'ємі реактора, виявляючи зони недогріву або температурної стратифікації. Реалізація цієї функції в умовах вибухонебезпечного середовища біогазу вимагає повної відмови від контактних струмознімачів, які є джерелом іскроутворення та мають низьку надійність. У запропонованій концепції живлення електронних компонентів ротора (цифрових датчиків, мікроконтролера та радіопередавача) здійснюється через спеціалізований повітряний (обертовий) трансформатор малої потужності (100–200 мВт). На рис.2 показано розміщення обертового трансформатора всередині ЗПЕП.

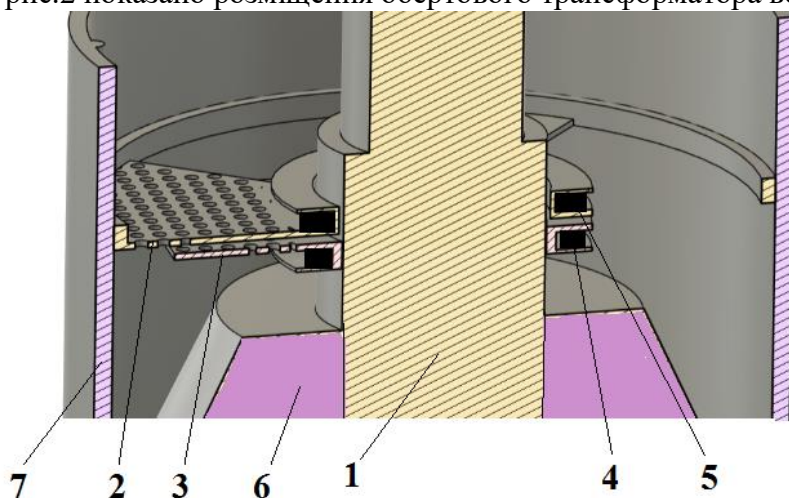


Рис.2. Розміщення обертового трансформатора всередині ЗПЕП:

1 – сталеве осердя; 2 – тримач вторинної обмотки; 3 – тримач первинної обмотки; 4 – первинна обмотка; 5 – вторинна обмотка; 6 – лобова частина обмотки статора; 7 – ротор

Тримач первинної обмотки закріплено на нерухомому статорі, а тримач з вторинною обмоткою – на внутрішній поверхні обертового ротора. Цей вузол забезпечує виключно

енергетичні потреби вимірювальної системи і гальванічно розв'язаний від силових кіл. Передача зібраних даних на зовнішній пульт керування здійснюється захищеним радіоканалом, що забезпечує герметичність конструкції та високу завадостійкість. У порівнянні з відомими системами [14-16] запропонований обертовий трансформатор має не тільки топологічні особливості, але й особливості режиму роботи в циклах вимірювання. Для усунення впливу системи живлення датчиків на теплову картину дослідження було розроблено спеціальний алгоритм роботи повітряного трансформатора. Оскільки безперервна робота трансформатора з повітряним осердям призводить до його власного нагріву (через значні струми намагнічування та низький коефіцієнт зв'язку), в мікропрограмі керування реалізовано імпульсний режим роботи. Мікроконтролер ATmega328PB керує подачею живлення на первинну обмотку трансформатора. Цикл вимірювання відбувається за наступним алгоритмом: активація (подавання напруги на трансформатор); очікування вимірів (час активного стану становить близько 2 секунд, що достатньо для заряду ємнісного фільтра на роторі, ініціалізації датчиків та передачі пакету даних); отримання вимірів (отримання пакету даних, дешифрування, перевірка на цілісність); відправка даних на термінал; пауза (вимкнення трансформатора на час паузи між вимірами).

Для оцінки динамічних властивостей обертового трансформатора було проведено серію вимірювань при зміні частоти вхідного П-подібного сигналу від 1,5 до 7 кГц. На рис.3 для однієї з експериментальних модифікацій ЗПЕП показано розміщення конструктивних елементів обертового трансформатора, мікроконтролера ATmega328PB, плати радіоканалу передача зібраних даних на зовнішній пульт керування.

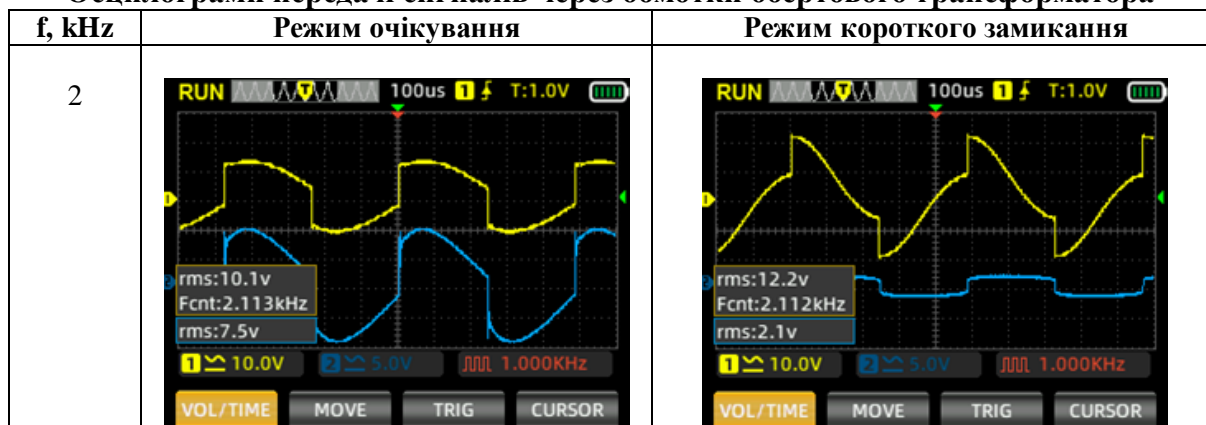


Рис.3. Розміщення вузлів бездротового внутрішнього моніторингу в експериментальному зразку ЗПЕП потужністю 1,5 кВт

У таблиці представлено осцилограми передачі сигналів через обмотки обертового трансформатора для штатної роботи системи живлення мікроконтролера: режим неробочого ходу (вторинна обмотка розімкнена) та режим короткого замикання (вторинна обмотка замкнена). На осцилограмах жовтий канал відповідає сигналу первинної обмотки, синій – вторинної;

З урахуванням отриманих результатів, найбільш збалансованими виявилися показники при 2 кГц: достатня індуквана напруга та помірний короткозамкнений струм, що мінімізує втрати та пікові перевантаження по струму. Саме ця частота й була обрана для штатної роботи системи живлення мікроконтролера.

Осцилограми передачі сигналів через обмотки обертового трансформатора



Підконцепція автоматизованого фізико-хімічного контролю. Для контролю хімічних та біологічних параметрів процесу (рівень рН, окисно-відновний потенціал Redox, наявність інгібіторів) використання постійно занурених датчиків є неефективним через швидке утворення біоплівки на їх чутливих елементах, що призводить до дрейфу показів та втрати точності. Тому концепція комплексу передбачає використання окремого зовнішнього модуля — пристрою для автоматичного контролю параметрів (ПАК). Алгоритм його роботи базується на циклічному принципі: введення зонда в реактор на задану глибину → стабілізація та вимірювання → виведення із зони реакції → гідроструминне очищення промивною рідиною → калібрування за еталонними розчинами або зберігання в захисному середовищі. Такий підхід дозволяє використовувати високочутливі лабораторні сенсори в жорстких промислових умовах, гарантуючи достовірність вимірювань протягом тривалого часу без необхідності ручного обслуговування персоналом [17].

Висновки. Запропонована концепція дозволяє перейти від пасивної стабілізації параметрів до активного керування кінетикою біохімічних реакцій, що забезпечує підвищення виходу біогазу, зниження енерговитрат на власні потреби та запобігання аварійним режимам роботи біогазового реактора.

Об'єднання ЗПЕП та ПАК у єдиний інформаційно-керуючий комплекс створює передумови для реалізації адаптивних алгоритмів керування біогазовим реактором. Система керування в реальному часі отримує масив даних про просторовий розподіл температури, непрямую оцінку в'язкості субстрату через аналіз електромагнітних параметрів статора ЗПЕП та точні дані про хімічний стан середовища від ПАК. На основі цієї інформації формуються керуючі впливи на обмотку статора ЗПЕП (зміна частоти та амплітуди напруги живлення), що дозволяє гнучко варіювати співвідношення між тепловою та механічною потужністю, а також на приводи ПАК для коригування частоти вимірювань.

Перспективами подальшого розвитку структури електротехнічного комплексу передбачено також зв'язок між результатами оцінки стану процесу метаногенеза не тільки за умовами впливу на субстрат через зміну режимних параметрів всередині біореактора, але й з умовами впливу на режим попередньої обробки сировини. Це стосується в першу чергу стійкої до біодеградації лігнінвмісної сировини.

Список використаних джерел

1. Kaletnik G. Production and use of biofuels: textbook. K.: Agrarian Science, 2021 (2018). 336 p.
2. Salminen E., Rintala J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste—a review. *Bioresource technology*. 2002. Vol. 83, no. 1. P. 13–26. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00199-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00199-7)
3. Кучерук П. П. Біогазові установки в сільському господарстві та на станціях очистки стічних вод. Київ: ІТТФ НАНУ, 2009. 25 с.
4. Feng R., Li J., Dong T., Li X. Performance of a novel household solar heating thermostatic biogas system. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 96. P. 519–526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.003>

5. Josimović L., Prvulović S., Djordjević L., Bicok I., Bakator M., Premčevski V., Šeljmeši D. Enhancing biogas plant efficiency for the production of electrical and thermal energy. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 13. P. 5858. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14135858>
6. Aworanti O. A., Ajani A. O., Agbede O. O., Agarry S. E., Ogunkunle O., Laseinde O. T., Kalam M. A., Fattah I. M. Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion: a comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. Article 1170133. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1170133>
7. Li W., Guo J., Cheng H., Wang W., Dong R. Two-phase anaerobic digestion of municipal solid wastes enhanced by hydrothermal pretreatment: Viability, performance and microbial community evaluation. *Applied Energy*. 2017. Vol. 189. P. 613–622. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.101>
8. Lima D., Appleby G., Li L. A scoping review of options for increasing biogas production from sewage sludge: Challenges and opportunities for enhancing energy self-sufficiency in wastewater treatment plants. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 5. Article 2369. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052369>
9. Aboughaly M., Fattah I. R. Environmental analysis, monitoring, and process control strategy for reduction of greenhouse gaseous emissions in thermochemical reactions. *Atmosphere*. 2023. Vol. 14, no. 4. P. 655. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14040655>
10. Singh A., Kumar V. Recent developments in monitoring technology for anaerobic digesters: A focus on bio-electrochemical systems. *Bioresource technology*. 2021. Vol. 329. P. 124937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124937>
11. Zabłodskiy M., Spodoba M., Spodoba O. Experimental investigation of energy consumption for the process of initial heating of a substrate for the use of electric heat-mechanical system. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 2022. No. 1. P. 49–59. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2022-1-5>
12. Skibko Z., Borusiewicz A., Filipkowski J., Pisarek Ł., Kuboń M. Impact of Farm Biogas Plant Auxiliary Equipment on Electrical Power Quality. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 14. P. 3849. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18143849>
13. Коваленко В. Л. Електрофізичні методи підвищення ефективності біогазових технологій: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.08. Київ, 2020. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Диссертація_Коваленко-В.Л..pdf
14. Xu Z. U., JIANG Q. Study of high frequency rotary transformer structures for contactless inductive power transfer. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2019. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921812>
15. Xie L., Yuan X. A High-Performance Phase-Shift Full-Bridge Converter with Rotary Transformer for the Field Excitation of Electric Machines. 2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). IEEE, 2024. P. 734–741. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM61530.2024.10609172>
16. Ditz S., Endruschat A., Schriefer T., Roskopf A., Heckel T. Inductive power transfer system with a rotary transformer for contactless energy transfer on rotating applications. 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2016. P. 1622–1625. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2016.7538876>
17. Zabłodskiy M., Babak D. Simulation of fluid spraying processes in a device for automatic control of anaerobic fermentation process parameters in biogas reactors. *Machinery & Energetics*. 2025. Vol. 16, no. 2. P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/2.2025.58>

CONCEPT OF CONSTRUCTION OF THE ELECTRICAL COMPLEX FOR MONITORING AND REGULATION OF THE BIOGAS REACTOR OPERATION MODE

M. Zabłodskiy, D. Babak

Abstract. *This article focuses on improving the operational efficiency of existing biogas plants through the implementation of an electrical system based on a submersible multifunctional electromechanical converter (PEMC). The aim of the study is to develop a concept for a system to monitor and regulate the operating mode of a biogas reactor. The system combines active thermomechanical and electromagnetic effects on the substrate with distributed intelligent monitoring. The system's architecture is based on the synergistic interaction of two functional subsystems: the PEMP—an actuator located directly within the reactor's working volume that provides simultaneous mixing, heating, and magnetization of the substrate, spatial temperature monitoring, rotation speed control, and, if necessary, the intensity of the magnetic field in the external rotor array; a device for automatic parameter control—a measurement module that provides periodic, high-precision monitoring of physicochemical parameters (pH, Redox, density, O₂,*

NH₃, H₂ content, etc.) with an automatic maintenance function (cleaning and calibration) for the sensors. This allows for the transition to comprehensive fermentation control, where thermal and mechanical flows are formed adaptively to the state of the medium. To evaluate the dynamic properties of the rotary transformer, a series of measurements was conducted on an experimental sample while varying the frequency of the input P-wave signal. It was found that the most balanced parameters were observed at 2 kHz: sufficient induced voltage and moderate short-circuit current. Future development prospects include linking the assessment of the methanogenesis process not only to the influence on the substrate through changes in operating parameters inside the bioreactor, but also to the conditions affecting the pretreatment of raw materials (primarily lignin-containing ones).

Keywords: *submersible multifunctional electromechanical converter, rotating transformer, contactless energy transfer system, monitoring of physicochemical parameters*

References

1. Kaletnik, G. (2021). Production and use of biofuels: textbook. K.: Agrarian Science.
2. Salminen, E., & Rintala, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste—a review. *Bioresource technology*, 83(1), 13-26. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00199-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00199-7)
3. Kucheruk, P. P. (2009). Biohazovi ustanovky v silskomu hospodarstvi ta na stantsiakh ochystky stichnykh vod [Biogas plants in agriculture and wastewater treatment plants]. Kyiv: ITTF NANU.
4. Feng, R., Li, J., Dong, T., & Li, X. (2016). Performance of a novel household solar heating thermostatic biogas system. *Applied Thermal Engineering*, 96, 519-526. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.003>
5. Josimović, L., Prvulović, S., Djordjević, L., Bicok, I., Bakator, M., Premčevski, V., ... & Šeljmeši, D. (2024). Enhancing biogas plant efficiency for the production of electrical and thermal energy. *Applied Sciences*, 14(13), 5858. <https://doi.org/10.3390/app14135858>
6. Aworanti, O. A., Ajani, A. O., Agbede, O. O., Agarry, S. E., Ogunkunle, O., Laseinde, O. T., Kalam, M. A., & Fattah, I. M. (2023). Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion: a comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1170133. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1170133>
7. Li, W., Guo, J., Cheng, H., Wang, W., & Dong, R. (2017). Two-phase anaerobic digestion of municipal solid wastes enhanced by hydrothermal pretreatment: Viability, performance and microbial community evaluation. *Applied Energy*, 189, 613-622. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.101>
8. Lima, D., Appleby, G., & Li, L. (2023). A scoping review of options for increasing biogas production from sewage sludge: Challenges and opportunities for enhancing energy self-sufficiency in wastewater treatment plants. *Energies*, 16(5), 2369. <https://doi.org/10.3390/en16052369>
9. Aboughaly, M., & Fattah, I. R. (2023). Environmental analysis, monitoring, and process control strategy for reduction of greenhouse gaseous emissions in thermochemical reactions. *Atmosphere*, 14(4), 655. <https://doi.org/10.3390/atmos14040655>
10. Singh, A., & Kumar, V. (2021). Recent developments in monitoring technology for anaerobic digesters: A focus on bio-electrochemical systems. *Bioresource technology*, 329, 124937. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124937>
11. Zablodskiy, M., Spodoba, M., & Spodoba, O. (2022). Experimental investigation of energy consumption for the process of initial heating of a substrate for the use of electric heat-mechanical system. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (1), 49-59. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2022-1-5>
12. Skibko, Z., Borusiewicz, A., Filipkowski, J., Pisarek, Ł., & Kuboń, M. (2025). Impact of Farm Biogas Plant Auxiliary Equipment on Electrical Power Quality. *Energies*, 18(14), 3849. <https://doi.org/10.3390/en18143849>
13. Kovalenko, V. L. (2020). Elektrofizychni metody pidvyshchennia efektyvnosti biohazovykh tekhnolohii [Electrophysical methods for improving the efficiency of biogas technologies] (Doctoral dissertation). Kyiv. https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Дисертація_Коваленко-В.Л..pdf
14. Xu, Z. U., & JIANG, Q. (2019, August). Study of high frequency rotary transformer structures for contactless inductive power transfer. In 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921812>
15. Xie, L., & Yuan, X. (2024, June). A High-Performance Phase-Shift Full-Bridge Converter with Rotary Transformer for the Field Excitation of Electric Machines. In 2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (pp. 734-741). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM61530.2024.10609172>

16. Ditze, S., Endruschat, A., Schriefer, T., Rosskopf, A., & Heckel, T. (2016, May). Inductive power transfer system with a rotary transformer for contactless energy transfer on rotating applications. In 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) (pp. 1622-1625). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2016.7538876>
17. Zablodskyi, M., & Babak, D. (2025). Simulation of fluid spraying processes in a device for automatic control of anaerobic fermentation process parameters in biogas reactors. Machinery & Energetics, 16(2), 58-69. <https://doi.org/10.31548/machinery/2.2025.58>