

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БАБАК ДЕНИС ОЛЕГОВИЧ

УДК 62-83-52: 621.3.079

ДИСЕРТАЦІЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ
РЕЖИМУ РОБОТИ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

14 «Електрична інженерія»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання

на відповідне джерело _____ Денис БАБАК

Науковий керівник

ЗАБЛОДСЬКИЙ Микола Миколайович,

доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Бабак Д. О. Електротехнічний комплекс моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2026.

Дисертація присвячена розробленню електротехнічного комплексу для поточного моніторингу і забезпечення ефективного гідродинамічного та теплового режимів біореактора на основі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача. Актуальність дослідження зумовлена тим, що Для агропромислового комплексу України, який генерує значні обсяги органічних відходів технологія анаеробного зброджування є безальтернативним шляхом раціонального природокористування. Вона дозволяє розв'язувати триєдину задачу: енергетичну (отримання біогазу для виробництва електроенергії та тепла), екологічну (утилізація екологічно небезпечних відходів, зменшення емісії метану в атмосферу) та агрохімічну (отримання високоякісних біодобрих – дігестату. Проте, попри значний потенціал, реальна ефективність експлуатації існуючих біогазових установок (БГУ) залишається значно 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.

Метою дисертаційної роботи є підвищення енергетичної ефективності біогазових установок та інтенсифікація виходу біогазу шляхом обґрунтування параметрів та розробки електротехнічного комплексу для поточного моніторингу і забезпечення ефективного гідродинамічного та теплового режимів біореактора на основі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше обґрунтовано і застосовано 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. Отримала подальший розвиток методологія побудови заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача енергії для перемішування, нагріву, омагнічування та моніторингу стану субстрату в біореакторі в умовах анаеробного зброджування шляхом застосування методів формування випереджаючого теплового потоку у зовнішньому масивному роторі і орієнтації інтегрованих теплових потоків виключно на зростання ентальпії субстрату, безредукторного забезпечення низької частоти обертання ротора, удосконалення математичної моделі силової частини електромагнітної системи, в якій навантажувально-охолоджуюче середовище (субстрат) включено у розрахункову область з урахуванням в моделі вектора густини поляризації і вектора намагніченості середовища, а параметри феромагнітних та провідних середовищ представлені матрицями електропровідності та магнітної проникності, розробки структурно та електромагнітно сумісної системи дистанційного моніторингу температурного стану і швидкості потоків субстрата на основі обертового трансформатора із застосуванням методу безконтактної передачі інформаційних сигналів і інтелектуального імпульсного алгоритму керування живленням, що дозволяє використовувати поліфункціональний електромеханічний перетворювач як мобільну платформу для цілей підвищення енергоефективності біогазового реактора. Вперше експериментально визначено енергетичні та динамічні властивості заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача зі складної геометричною формою зовнішнього ротора – виконавчого органу у в'язкому неньютонівському середовищі в умовах вимушеної конвекції для трьох варіантів живлення: трифазного автотрансформатора напруги промислової частоти; промислового перетворювача

частоти та розробленого трифазного симісторного регулятора напруги, що дозволило сформувати базу характеристик для вибору законів керування системою живлення з оптимальним розподілом складових корисної потужності, а саме: енергії нагріву; механічної енергії й енергії зовнішнього електромагнітного поля. Вперше за запропонованою методикою експериментально визначено енергетичні характеристики та динамічні властивості обертового трансформатора у складі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача залежно від осьової відстані між обмотками та обґрунтовано вибір робочої частоти ШІМ-сигналу прямокутної форми системи живлення з урахуванням полів розсіювання лобових частин обмотки статора, а з використанням кінцево-елементної математичної моделі встановлені закономірності розподілу магнітної індукції та рівень електромагнітного зв'язку обмоток, що забезпечує стабільність живлення на всіх етапах вимірювального циклу і високу метрологічну достовірність контрольованих параметрів обертової частини поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

Практичне значення роботи полягає у розробленні та впровадженні інженерної методики розрахунку заглиблених поліфункціональних перетворювачів, яка дозволяє проектувати обладнання для біореакторів різного об'єму з урахуванням реологічних властивостей сировини. Створено експериментальний зразок пристрою для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах (захищено патентом на корисну модель № 153026). Пристрій забезпечує підвищення точності вимірювання температури на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та дозволяє інтегрувати локальну автоматику в загальну SCADA-систему підприємства. Запропонована система моніторингу та керування дозволяє знизити питомі енерговитрати на власні потреби біогазової установки на 10–15 % за рахунок оптимізації режимів роботи нагрівачів та мішалок, а також підвищити вихід біогазу за рахунок стабілізації температурного режиму. Розроблені методи і компоненти системи використано в навчальному процесі НУБіП України при підготовці магістрів та докторів філософії за спеціальністю G3 «Електрична інженерія», зокрема, в курсах «Закономірності енергетичних перетворень» та «Автоматизація біотехнологічних виробництв». Результати дослідження апробовано – матеріали дисертації доповідалися на низці

міжнародних і всеукраїнських конференцій з питань розвитку галузі електричної інженерії.

У вступі подано загальну характеристику дослідження, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання, визначено об'єкт, предмет, методи дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів та структуру дисертації.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану та проблем розвитку біогазових технологій. Встановлено, що ефективність керування біотехнологічним процесом безпосередньо залежить від точності та репрезентативності вимірювальної інформації: температури субстрату, рівня рН, тиску газу, рівня рідини, концентрації метану в біогазі. Виявлено протиріччя між необхідністю точного підтримання температури (з точністю до 0,5–1,0 °С для термофільного режиму) та відсутністю технічних засобів для моніторингу температури в ядрі реактора. Показано перспективність використання заглибних поліфункціональних електромеханічних перетворювачів, які поєднують функції джерела теплової енергії та перемішування.

У другому розділі запропонована концепція побудови інтегрованого електротехнічного комплексу, який об'єднує функції активного термомеханічного і магнітного впливу на субстрат та розподіленого інтелектуального моніторингу. Представлені матеріали по розробці та дослідженню заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача з розширеними функціями моніторингу для біотехнологічних систем. Представлені результати моделювання та аналізу електромагнітних і електромеханічних процесів заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача з використанням удосконаленої математичної моделі, в якій навантажувально-охолоджуюче середовище (субстрат) представлено як елемент ПЕМП і включено у розрахункову область з урахуванням в моделі вектора густини поляризації і вектора намагніченості середовища. Представлені результати розробки апаратно-програмного комплексу керування та збору даних з обертових частин заглибного ПЕМП та результати дослідження обертового трансформатора для

безконтактного передавання енергії в системі моніторингу технологічних параметрів із аксіальним розміщенням обмоток.

Третій розділ присвячено науковому обґрунтуванню та розробленню пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння. Здійснено математичне моделювання гідродинамічних процесів у системі розпилення промивної рідини та очищення сенсорів. Обґрунтовані режими роботи електроприводів пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння та технічні рішення з забезпечення вибухозахищеності електрообладнання електротехнічного комплексу.

У четвертому розділі містяться результати експериментальних досліджень основних вузлів електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора відповідно до програми та методики проведення комплексних експериментальних досліджень. Представлені результати оцінки узгодженості роботи системи автоматичного очищення сенсорів та електромеханічного перетворювача, надійності та точності системи дистанційного моніторингу параметрів, аналізу енергетичної та економічної ефективності та перспектив впровадження електротехнічного комплексу.

У висновках узагальнено результати дослідження та сформульовано основні наукові й практичні здобутки. Обґрунтовано концепцію та структуру інтегрованого електротехнічного комплексу, який об'єднує функції активного термомеханічного і магнітного впливу на субстрат та розподіленого інтелектуального моніторингу, що забезпечує підвищення стабільності технологічних параметрів і енергоефективності біогазового реактора. Створена система дистанційного моніторингу температурного стану і швидкості потоків субстрату 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. Розроблені математичні моделі поліфункціонального електромеханічного перетворювача, обертового трансформатора для безконтактного передавання енергії в системі моніторингу технологічних параметрів, гідродинамічних процесів у системі розпилення промивної рідини та очищення сенсорів пристрою автоматичного контролю, адекватність яких доведена експериментальними дослідженнями на натурних зразках вузлів електротехнічного комплексу.

Ключові слова: біогазовий реактор, електротехнічний комплекс, поліфункціональний електромеханічний перетворювач, система дистанційного моніторингу, обертовий трансформатор, інформаційно-аналітична система, інтелектуальна технологія, математична модель.

ABSTRACT

Babak D. O. Electrotechnical complex for monitoring and regulating the operation mode of a biogas reactor. Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics". National University of Life Resources and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of an electrotechnical complex for current monitoring and ensuring effective hydrodynamic and thermal regimes of a bioreactor based on a submersible multifunctional electromechanical converter. The relevance of the research is due to the fact that for the agro-industrial complex of Ukraine, which generates significant volumes of organic waste, the technology of anaerobic digestion is an unalternative way of rational environmental management. It allows solving a triple problem: energy (obtaining biogas for electricity and heat production), environmental (disposal of environmentally hazardous waste, reduction of methane emissions into the atmosphere) and agrochemical (obtaining high-quality biofertilizers - digestate. However, despite the significant potential, the real efficiency of the operation of existing biogas plants

(BGU) remains significantly lower than the calculated one. Analysis of the operation of industrial bioreactors shows that the limiting factor in productivity is not so much the biochemical potential of the raw material, but the imperfection of electrical and thermal systems for ensuring the technological process. The purpose of the dissertation is to increase the energy efficiency of biogas plants and intensify the biogas yield by substantiating the parameters and developing an electrical complex for current monitoring and ensuring effective hydrodynamic and thermal regimes of the bioreactor based on a submersible multifunctional electromechanical converter.

The scientific novelty of the obtained results lies in the scientific substantiation, development and practical implementation of an integrated electrotechnical complex, which combines the functions of active thermomechanical and magnetic influence on the substrate and distributed intelligent monitoring. Unlike known analogues, the architecture of the complex is based on the synergistic effect of the interaction of three functional subsystems: a submersible multifunctional electromechanical converter for generating thermal energy, creating hydrodynamic flows and magnetizing the substrate; a device for automatic measurement of environmental parameters and a biogas reactor operating mode control system, which ensures increased stability of technological parameters and energy efficiency of the biogas reactor. The system for remote monitoring of the temperature state and substrate flow rate in the bioreactor has been further developed by using the method of contactless transmission of information signals from sensors placed on the rotating elements of the submersible multifunctional electromechanical converter as a mobile platform for scanning the reactor volume in an aggressive environment, an intelligent pulse power control algorithm, a binary exchange protocol, and a cyclic redundant code algorithm. The mathematical model of the multifunctional electromechanical converter has been improved, in which the load-cooling medium (substrate) is represented as an element of the PEMP and is included in the calculation area, taking into account the polarization density vector in the model, which includes all the induced current, and the magnetization vector of the medium. For the first time, the dynamic properties of a submerged multifunctional electromechanical converter with a complex geometric shape of the executive part in a viscous non-Newtonian medium under forced convection conditions were experimentally investigated, which

allowed optimizing the specific heat load of the surface and preventing thermal shock of bacteria and adhesion of the substrate (coking). Using the proposed finite element mathematical model of a rotating transformer for contactless energy transfer in a system for monitoring technological parameters with axial arrangement of windings and use of an input U-shaped signal with a frequency of 1.5 to 7 kHz, the patterns of magnetic induction distribution in the area of the rotating transformer location and its dynamic properties were established.

The practical significance of the work lies in the development and implementation of an engineering methodology for calculating submerged multifunctional converters, which allows designing equipment for bioreactors of various volumes taking into account the rheological properties of the raw material. An experimental sample of a device for automatic control of the parameters of the anaerobic fermentation process in biogas reactors has been created (protected by a patent for a utility model No. 153026). The device provides an increase in the accuracy of temperature measurement by 0.5 °C and allows integrating local automation into the general SCADA system of the enterprise. The proposed monitoring and control system allows reducing the specific energy consumption for the own needs of the biogas plant by 10–15% by optimizing the operating modes of heaters and mixers, as well as increasing the biogas yield by stabilizing the temperature regime. The developed methods and components of the system were used in the educational process of NUBiP of Ukraine in the preparation of masters and doctors of philosophy in the specialty G3 "Electrical Engineering", in particular, in the courses "Regularities of Energy Transformations" and "Automation of Biotechnological Production". The results of the study were approved - the materials of the dissertation were reported at a number of international and all-Ukrainian conferences on the development of the field of electrical engineering.

The introduction provides a general description of the study, justifies the relevance of the topic, formulates the goal and objectives, defines the object, subject, methods of the study, outlines the scientific novelty and practical significance of the results, provides information about the personal contribution of the applicant, approval of the results and the structure of the dissertation.

The first section is devoted to the analysis of the current state and problems of the development of biogas technologies. It was established that the efficiency of biotechnological process control directly depends on the accuracy and representativeness of the measurement information: substrate temperature, pH level, gas pressure, liquid level, methane concentration in biogas. A contradiction was revealed between the need for accurate temperature maintenance (with an accuracy of up to 0.5–1.0 °C for the thermophilic mode) and the lack of technical means for monitoring the temperature in the reactor core. The prospects of using submersible multifunctional electromechanical converters that combine the functions of a heat energy source and mixing are shown.

The second chapter presents a concept for the development of an integrated electrical engineering system that combines the functions of active thermomechanical and magnetic influence on the substrate with distributed intelligent monitoring. The paper presents materials on the development and research of a submersible multifunctional electromechanical transducer with advanced monitoring functions for biotechnological systems. The results of modeling and analysis of electromagnetic and electromechanical processes in a buried multifunctional electromechanical transducer are presented using an improved mathematical model, in which the loading and cooling medium (substrate) is represented as an element of the EMT and included in the computational domain, taking into account the polarization density vector and the magnetization vector of the medium in the model. The results of the development of a hardware-software complex for control and data acquisition from the rotating parts of a submersible PEMT are presented, along with the results of research on a rotary transformer for contactless energy transfer in a process parameter monitoring system with axially arranged windings.

The third chapter is devoted to the scientific justification and development of a device for automatic control of anaerobic fermentation parameters. Mathematical modeling of hydrodynamic processes in the system of wash liquid spraying and sensor cleaning has been performed. The operating modes of the electric drives of the device for automatic control of anaerobic fermentation parameters and technical solutions to ensure the explosion-proof protection of the electrical equipment of the electrical complex are substantiated.

The fourth section contains the results of experimental research on the main nodes of the electrotechnical complex for monitoring and regulating the operating mode of a biogas reactor in accordance with the program and methodology for conducting comprehensive experimental research. The results of the assessment of the consistency of the operation of the automatic cleaning system of sensors and the electromechanical converter, the reliability and accuracy of the remote monitoring system of parameters, the analysis of energy and economic efficiency and the prospects for the implementation of the electrical complex are presented.

The conclusions summarize the results of the study and formulate the main scientific and practical achievements. The concept and structure of the integrated electrical complex, which combines the functions of active thermomechanical and magnetic effects on the substrate and distributed intelligent monitoring, which ensures increased stability of technological parameters and energy efficiency of the biogas reactor, are substantiated. A system for remote monitoring of the temperature state and substrate flow rate in a bioreactor has been created by using the method of contactless transmission of information signals from sensors placed on the rotating elements of a submersible multifunctional electromechanical transducer as a mobile platform for scanning the reactor volume in an aggressive environment, an intelligent pulse power control algorithm, a binary exchange protocol, a cyclic redundancy code algorithm that minimizes parasitic heat generation, ensuring high metrological purity of signals, increases the reliability of the system and the accuracy of temperature control in the bioreactor core. Mathematical models of a multifunctional electromechanical transducer, a rotating transformer for contactless energy transfer in the system for monitoring technological parameters, hydrodynamic processes in the system for spraying washing liquid and cleaning sensors of an automatic control device have been developed, the adequacy of which has been proven by experimental studies on full-scale samples of the electrical complex components.

Keywords: biogas reactor, electrical complex, multifunctional electromechanical converter, remote monitoring system, rotating transformer, information and analytical system, intelligent technology, mathematical model.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Zablodskiy, M., Klendiy, P., Dudar, O., & **Babak, D.** (2024). Energy Efficiency of the Extrusion Process and its Effect on Output of Biogas during the Fermentation of Maize and Rape Straw. *Problemele Energeticii Regionale*, 61(1), 127-139. DOI: doi.org/10.52254/1857-0070.2024.1-61.11 (*Zablodskiy, M. розробив програму дослідження та відредагував статтю, Klendiy, P. провів експериментальні дослідження і моделювання, Dudar, O. здійснила підготовку проб для дослідження та оформила статтю, Babak, D. розробив імітаційну модель і виконав обробку експериментальних даних*)

2. Zablodskyi 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: 10.31548/machinery/2.2025.58 (*Zablodskiy, M. розробив програму дослідження та відредагував статтю, Babak, D. розробив математичну модель, виготовив дослідний зразок, провів експериментальні дослідження та моделювання*)

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

3. Заблодський М. М., **Бабак Д. О.** Концепція побудови електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора. *Енергетика і автоматика*, № 1 (2026), 64-74. [https://doi.org/10.31548/energiya1\(83\).2026.064](https://doi.org/10.31548/energiya1(83).2026.064) (*Заблодський М. М., розробив підконцепцію перетворення енергії в заглибному поліфункціональному перетворювачі, підготував статтю до друку, Бабак Д. О. розробив підконцепції бездротового внутрішнього моніторингу та автоматизованого фізико-хімічного контролю електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора*).

4. **Бабак Д. О.** Дослідження обертового трансформатора системи моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора. *Енергетика і автоматика*, № 2 (2026), 107-118 DOI: 10.31548/energiya2(84).2026.107

Тези наукових доповідей

5. **Бабак Д.О.**, Заблодський М.М. Інформаційні технології й альтернативна енергетика в епоху розвитку інновацій та штучного інтелекту: Аналіз впливу змінних навантажувальних умов на ефективність і продуктивність роботи помпи: Освіта і наука в умовах викликів і загроз. Внесок молодих вчених в сталий розвиток, м. Київ, 21 листопада 2024 року: тези доповіді. С. 362–363. *(Бабак Д.О. розробив макетний зразок і провів експериментальні дослідження навантажувальних характеристик, Заблодський М.М. здійснив наукове консультування та валідацію технічних рішень)*.

6. **Бабак Д.О.**, Заблодський М.М. Управління енергоефективністю технологічних комплексів: Використання обертового трансформатора в системі дистанційного моніторингу температурного режиму біореактора: III Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності», м. Київ, 6 червня 2025 року: тези доповіді. С. 120–121. *(Бабак Д.О. розробив макетний зразок і провів експериментальні дослідження обертового трансформатора в системі дистанційного моніторингу, Заблодський М.М. здійснив наукове консультування та перевірку коректності технічних рішень)*

7. **Бабак Д.О.**, Заблодський М.М. Проблеми теорії і практики електричних машин: Система дистанційного моніторингу стану заглибного електромеханічного перетворювача на основі обертового трансформатора: Міжнародний симпозіум «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA'2025), м. Харків, 30 жовтня 2025 року: тези доповіді. С. 120–121. *(Бабак Д.О. розробив макетний зразок і провів експериментальні дослідження системи дистанційного моніторингу стану заглибного електромеханічного перетворювача, Заблодський М.М. здійснив наукове консультування та перевірку коректності технічних рішень)*

8. **Бабак Д.О.**, Заблодський М.М. Система вимірювання параметрів обертової частини заглибного електромеханічного перетворювача для автоматичного керування процесом анаеробної ферментації. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми сучасної енергетики», Київ, 2025р. С.95-96. *(Бабак Д.О. розробив макетний зразок і провів експериментальні дослідження, Заблодський М.М. здійснив наукове консультування та узагальнив результати)*

Патенти України

9. Пат. 155766 Україна, МПК G01N 1/10. Пристрій для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах / Заблодський М. М., **Бабак Д. О.**, Троханяк В. І., Шворов С. А. № u202305616; заявл. 22.11.2023; опубл. 04.04.2024, Бюл. № 14/2024. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1791043/> (Заблодський М.М. оформлено заявку на корисну модель; Бабак Д.О взято участь у виготовленні макетного зразка і виконанні досліджень, виконано статистичну обробку даних та підготовлено матеріали до патентування; Троханяк В. І. взято участь у виконанні досліджень; Шворов С. А. взято участь у пошуку прототипу для оформлення патенту)

Зміст

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	7
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	12
СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМ РОЗВИТКУ	
БІОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	29
1.1. Огляд методів і засобів забезпечення температурного режиму біореакторів ..	30
1.2. Аналіз ефективності систем перемішування субстрату в біогазових установках	32
1.2.1. Аналіз науково-технічної літератури за напрямом побудови заглибних електромеханічних перетворювачів для змішувачів біогазових реакторів	33
1.2.2. Заглибні змішувачі з електродвигунами, які оснащені суцільними та зовнішніми роторами	36
1.2.3. Огляд досліджень суміщених систем нагріву, перемішування і омагнічування субстрату	39
1.3. Огляд систем моніторингу та автоматичного керування параметрами біореактора.....	42
1.4. Аналіз патентної та науково-технічної літератури за напрямом автоматизації біогазових комплексів	43
Висновки до розділу 1.....	44
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА	
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ	
РЕЖИМУ РОБОТИ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА.....	46
2.1. Концепція побудови електротехнічного комплексу.....	46

2.2. Конструктивні рішення і устаткування електротехнічного комплексу для здійснення автоматичного управління параметрами процесу анаеробного бродіння.....	50
2.3. Ключові аспекти побудови поліфункціонального електромеханічного перетворювача енергії для перемішування, нагріву та омагнічування субстрату ..	54
2.4 Моделювання та аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача.....	60
2.5. Моделювання та експериментальні дослідження магнітного поля, що створюється нагрівальним кабелем, який розміщений у лопатях мішалки біогазового реактора.....	67
2.6. Розробка апаратно-програмного комплексу керування та збору даних з обертових частин заглибного ПЕМП	74
2.7. Розробка та реалізація системи безконтактного живлення.....	79
2.8. Моделювання та експериментальні дослідження обертового трансформатора	84
2.9. Дослідження динамічних режимів роботи системи моніторингу.....	95
2.10. Розробка трифазного симісторного регулятора напруги.....	99
2.10.1. Апаратне забезпечення та схемотехнічні рішення симісторного регулятора напруги.....	100
2.10.2. Програмна реалізація алгоритмів фазового керування та плавного пуску	104
2.10.3. Дослідження асиметрії фазового керування та модернізація системи захисту	105
Висновки до розділу 2.....	107

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ...	110
--	-----

3.1. Обґрунтування принципів створення пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння.....	110
3.2. Математичне моделювання гідродинамічних процесів у системі розпилення промивної рідини та очищення сенсорів	114
3.3. Алгоритмічне та апаратне забезпечення системи керування	120
3.4. Обґрунтування режимів роботи електроприводів пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння.....	124
3.5. Дослідження характеристик модифікацій крокового електродвигуна в системі автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння.....	124
Висновки до розділу 3.....	128

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА.....	129
4.1. Програма та методика проведення комплексних експериментальних досліджень.....	129
4.2. Експериментальні дослідження електромеханічного перетворювача з розширеними функціями моніторингу для біотехнологічних систем.....	130
4.2.1. Дослідження магнітного поля на поверхні заторможеного ротора.....	130
4.2.2. Дослідження режимів роботи ПЕМП при живленні від трифазного автотрансформатора	134
4.2.3. Дослідження режимів роботи ПЕМП при живленні від частотного перетворювача.....	137
4.2.4. Дослідження режимів роботи ПЕМП при живленні від симісторного регулятора напруги.....	141
4.3. Експериментальні дослідження обертового трансформатора у складі поліфункціонального електромеханічного перетворювача.....	146

4.4. Дослідження узгодженості роботи системи автоматичного очищення сенсорів та електромеханічного перетворювача	149
4.5. Оцінка надійності та точності системи дистанційного моніторингу параметрів	151
4.6. Аналіз енергетичної та економічної ефективності та перспективи впровадження електротехнічного комплексу	153
4.6.1. Аналіз досягнутих ефектів впливу магнітного поля на процеси метаногенезу	153
4.6.2. Аналіз енергетичної ефективності та синергетичного ефекту розробленого електротехнічного комплексу.....	157
Висновки до розділу 4.....	168
ВИСНОВКИ.....	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	172
ДОДАТКИ	186

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

БГУ – біогазова установка

CFD – обчислювальна гідродинаміка

ПЕМП – поліфункціональний електромеханічний перетворювач

ПФР – порожнистий феромагнітний ротор

ДМ і ГМ – двигуновий і гальмуючий модулі

SCADA – програмно-апаратний комплекс для диспетчерського контролю, збору даних та управління технологічними процесами у реальному часі

ВРХ – велика рогата худоба

ПАК – пристрій для автоматичного контролю параметрів

pH – водневий показник

ОВП – окисно-відновний потенціал

Ansys Fluent – програмне середовище

HART – гібридний промисловий протокол зв'язку

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ATEX – європейський стандарт вибухозахищеного обладнання

H – напруженість магнітного поля, А/м

E – напруженість електричного поля, В/м

ВГ – вищі гармоніки

T – тензор напруженості Максвелла для електромагнітного поля

B_n – нормальна складова щільності магнітного потоку

B_t – тангенціальна складова щільності магнітного потоку

$\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ – вектор густини поляризації

$\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ – вектор намагніченості середовища

ВСТУП

Актуальність теми. 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 розв'язувати 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].

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 [3]. 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») [4].

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 [5,6].

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]. Крім того, наявність рухомих частин, що проходять крізь стінку реактора, створює проблеми з герметизацією та витокami вибухонебезпечного метану.

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 [8]. Відсутність достовірних даних про стан субстрату в «ядрі» реактора унеможлиблює реалізацію адаптивних алгоритмів керування, які б дозволяли оптимізувати енерговитрати залежно від поточної стадії бродіння.

У роботах вітчизняних та закордонних вчених [9, 10] 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.

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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася як складова частина комплексних наукових досліджень кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП України). Тематика досліджень узгоджується з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки України «Енергетика та енергоефективність», затвердженим Законом України. Робота безпосередньо пов'язана з виконанням завдань держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України, зокрема: науково-дослідної роботи «Розробка електротехнологічного комплексу з гібридною системою енергозабезпечення для переробки побічних продуктів птахівництва у паливо, біологічні корми та добрива» (номер державної реєстрації 0120U102105);

науково-дослідної роботи «Розробка електротехнології підготовки та спалювання паливних сумішей з утилізованою водою та рідинними відходами різного походження» (номер державної реєстрації 0123U102165).

Дослідження також корелюють із цілями «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» в частині стимулювання розвитку біоенергетики та заміщення природного газу альтернативними видами палива, а також з Європейськими директивами щодо відновлюваної енергетики (RED II), які імплементуються в законодавство України. Внесок автора полягає в обґрунтуванні та розробці апаратного забезпечення

(електротехнічного комплексу), необхідного для практичної реалізації зазначених програм на рівні конкретних біогазових станцій.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності біогазових установок та інтенсифікація виходу біогазу шляхом обґрунтування параметрів та розробки електротехнічного комплексу для поточного моніторингу і забезпечення ефективного гідродинамічного та теплового режимів біореактора на основі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **науково-практичні завдання:**

1. Провести системний аналіз сучасних електротехнічних засобів і методів керування технологічними процесами в біогазових установках. Виявити основні фактори, що знижують ефективність традиційних систем нагрівання та перемішування, а також визначити обмеження існуючих методів вимірювання фізико-хімічних параметрів субстрату в умовах агресивного середовища.
2. Обґрунтувати структуру та принцип дії електротехнічного комплексу на базі заглибного поліфункціонального перетворювача, який забезпечує поєднання функцій активного перемішування, нагрівання субстрату безпосередньо в зоні реакції та бездротового моніторингу температурного поля.
3. Розробити математичну модель взаємозв'язаних електромагнітних, теплових та гідродинамічних процесів у робочому об'ємі біореактора за наявності заглибного джерела тепла і руху. Дослідити вплив конструктивних параметрів перетворювача на рівномірність розподілу температури та швидкостей потоків ньютонівської рідини (біосубстрату).
4. Розробити схемотехнічні рішення та алгоритми функціонування зовнішньої плати керування та спеціалізованого пристрою для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння. Забезпечити можливість вимірювання температури, параметрів повітряного середовища над дзеркалом рідини та електричних параметрів перетворювача для непрямой оцінки в'язкості субстрату.

5. Створити експериментальний зразок електротехнічного комплексу та провести комплекс експериментальних досліджень його теплових і електромеханічних характеристик. Перевірити адекватність розроблених математичних моделей та ефективність системи дистанційної передачі даних з рухомих частин перетворювача.
6. Здійснити техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження розробленого електротехнічного комплексу в промислові біогазові установки та оцінити термін окупності запропонованих рішень.

Об'єкт дослідження – процеси електромеханічного перетворення енергії, тепломасообміну та гідродинаміки в гетерогенному середовищі біогазового реактора при використанні заглибних джерел теплової та механічної енергії.

Предмет дослідження – закономірності функціонування, параметри та режими роботи електротехнічного комплексу поточного моніторингу і керування біогазовим реактором на основі поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у дисертаційній роботі використано комплексний підхід, що базується на поєднанні теоретичних досліджень та експериментальної перевірки отриманих результатів:

- *Методи теорії електромагнітного поля* – для аналізу електромагнітних процесів у заглибному перетворювачі та розрахунку його енергетичних характеристик.
- *Методи механіки рідини та газу (обчислювальна гідродинаміка CFD)* – для чисельного моделювання полів швидкостей та температур у реакторі, аналізу зон застою та оцінки ефективності перемішування субстрату, що має властивості неньютонівської рідини
- *Методи теорії автоматичного керування та інформаційно-виміральної техніки* – при розробці структури системи моніторингу, алгоритмів роботи мікроконтролера та протоколів бездротової передачі даних від обертових частин перетворювача.
- *Експериментальні методи* – для дослідження теплових режимів роботи перетворювача, перевірки точності вимірювання температури розробленим

пристроєм контролю та визначення енергоспоживання комплексу в різних режимах роботи.

- *Методи математичної статистики* – для обробки результатів експериментів, оцінки похибок вимірювань та перевірки достовірності отриманих даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розв'язання науково-прикладної задачі підвищення ефективності біогазових технологій і зводиться до таких положень:

1. Вперше обґрунтовано і застосовано 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.

2. Отримала подальший розвиток методологія побудови заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача енергії для перемішування, нагріву, омагнічування та моніторингу стану субстрату в біореакторі в умовах анаеробного зброджування шляхом застосування методів формування випереджаючого теплового потоку у зовнішньому масивному роторі і орієнтації інтегрованих теплових потоків виключно на зростання ентальпії субстрату, безредукторного забезпечення низької частоти обертання ротора, удосконалення математичної моделі силової частини електромагнітної системи, в якій навантажувально-охолоджуюче середовище (субстрат) включено у розрахункову область з урахуванням в моделі вектора густини поляризації і вектора намагніченості середовища, а параметри феромагнітних та провідних середовищ представлені матрицями електропровідності та магнітної проникності, розробки структурно та електромагнітно сумісної системи дистанційного моніторингу температурного стану

і швидкості потоків субстрата на основі обертового трансформатора із застосуванням методу безконтактної передачі інформаційних сигналів і інтелектуального імпульсного алгоритму керування живленням, що дозволяє використовувати поліфункціональний електромеханічний перетворювач як мобільну платформу для цілей підвищення енергоефективності біогазового реактора.

3. Вперше експериментально визначено енергетичні та динамічні властивості заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача зі складної геометричною формою зовнішнього ротора – виконавчого органу у в'язкому неньютонівському середовищі в умовах вимушеної конвекції для трьох варіантів живлення: трифазного автотрансформатора напруги промислової частоти; промислового перетворювача частоти та розробленого трифазного симісторного регулятора напруги, що дозволило сформувати базу характеристик для вибору законів керування системою живлення з оптимальним розподілом складових корисної потужності, а саме: енергії нагріву; механічної енергії і енергії зовнішнього електромагнітного поля.

4. Вперше за запропонованою методикою експериментально визначено енергетичні характеристики та динамічні властивості обертового трансформатора у складі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача в залежності від осьової відстані між обмотками та обґрунтовано вибір робочої частоти ШІМ-сигналу прямокутної форми системи живлення з урахуванням полів розсіювання лобових частин обмотки статора, а з використанням кінцево-елементної математичної моделі встановлені закономірності розподілу магнітної індукції та рівень електромагнітного зв'язку обмоток, що забезпечує стабільність живлення на всіх етапах вимірювального циклу і високу метрологічну достовірність контрольованих параметрів обертової частини поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено та впроваджено інженерну методику розрахунку заглибних поліфункціональних перетворювачів, яка дозволяє проєктувати обладнання для біореакторів різного об'єму з урахуванням реологічних властивостей сировини.

2. Створено експериментальний зразок пристрою для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах (захищено патентом на корисну модель № 155766). Пристрій забезпечує підвищення точності вимірювання температури на 0,5 °С та дозволяє інтегрувати локальну автоматику в загальну SCADA-систему підприємства.
3. Запропонована система моніторингу та керування дозволяє знизити питомі енерговитрати на власні потреби біогазової установки на 10–15 % за рахунок оптимізації режимів роботи нагрівачів та мішалок, а також підвищити вихід біогазу за рахунок стабілізації температурного режиму .
4. Розроблено комп'ютерні програми: функціонування експериментального стенда; налаштування трифазного симісторного регулятора на ESP32-S2; функціонування мікроконтролера на роторі ПЕМП.
5. Результати досліджень впроваджено в навчальний процес НУБіП України при підготовці магістрів та докторів філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», зокрема в курсах «Спеціальні електричні машини» та «Автоматизація біотехнологічних виробництв».

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно виконано проектування архітектури системи, розробку програмних модулів та методів аналітики. Особисто реалізовано схему збору та агрегації даних в системі моніторингу, побудовано експериментальний зразок електротехнічного комплексу. Усі експериментальні дослідження, налаштування програмного забезпечення та аналіз результатів виконано за активної участі здобувача, що підтверджено документально та апробацією окремих результатів.

Апробація результатів дослідження дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались на: III Міжнародній науково-практичній конференції «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності», м. Київ, 6 червня 2025 року; Міжнародному симпозіуму «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA'2025), м. Харків, 30 жовтня 2025 року; Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної енергетики», Київ, 2025р.; Всеукраїнській науково-

практичній конференції «Освіта і наука в умовах викликів і загроз. Внесок молодих вчених в сталий розвиток», м. Київ, 21 листопада 2024 року.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, з яких 2 статті у фахових виданнях України включених до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті – у зарубіжних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у фахових виданнях України, патент України на корисну модель та 4 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, огляду літератури, матеріалів і методів дослідження, результатів досліджень, аналізу та узагальнення результатів досліджень, висновків і пропозицій виробництву, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації викладено на 168 сторінках, робота ілюстрована 9 таблицями і 56 рисунками. Список використаної літератури нараховує 122 джерел, з них 113 латиницею.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМ РОЗВИТКУ БІОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Розвиток біогазових технологій у світі та Україні зумовлений необхідністю вирішення комплексу енергетичних та екологічних завдань. За даними Біоенергетичної асоціації України, потенціал виробництва біогазу з відходів сільського господарства становить мільярди кубічних метрів у перерахунку на природний газ. Основними видами сировини є гній ВРХ, свиней, пташиний послід, а також силосна кукурудза та пожнивні рештки [3].

Процес виробництва біогазу базується на анаеробному зброджуванні (метаногенезі) – багатостадійному біохімічному процесі розкладання органічних речовин без доступу кисню. Ефективність цього процесу безпосередньо залежить від створення сприятливих умов для життєдіяльності консорціуму бактерій. Дослідники [1, 15] виділяють такі критичні параметри процесу:

- температурний режим (психрофільний, мезофільний, термофільний);
- рівень рН середовища;
- співвідношення вуглецю до азоту (C/N);
- інтенсивність перемішування субстрату;
- періодичність завантаження сировини.

Сучасні промислові біогазові установки (БГУ) переважно працюють у мезофільному (30–40 °С) або термофільному (50–60 °С) режимах. Термофільний режим характеризується вищою швидкістю реакції та більшим виходом біогазу (на 30–50 % порівняно з мезофільним), проте він є значно чутливішим до коливань температури. Згідно з дослідженнями [16], відхилення температури в термофільному реакторі навіть на 0,5–1,0 °С може призвести до зниження продуктивності на 15–20 % через температурний шок метаногенів.

Однією з головних проблем експлуатації існуючих реакторів великого об'єму (понад 1000 м³) є забезпечення гомогенності середовища. Біосубстрат являє собою неньютонівську рідину, в'язкість якої змінюється залежно від вологості, складу сировини та температури. Як зазначається у працях [5, 17], при використанні

традиційних систем перемішування у реакторах часто утворюються застійні зони («мертві зони»), об'єм яких може досягати 30 % від загального робочого простору. У цих зонах не відбувається активного газовиділення, накопичується осад, що зменшує корисну ємність споруди та знижує загальну рентабельність виробництва.

Також, аналіз аварійних ситуацій на діючих БГУ показує, що значна частина відмов пов'язана з виходом з ладу систем механічного перемішування (поломки валів, редукторів, розгерметизація ущільнень) [7]. Це зумовлює необхідність пошуку нових технічних рішень, які б дозволили підвищити надійність обладнання та забезпечити більш ефективне керування гідродинамічними процесами в реакторі.

1.1. Огляд методів і засобів забезпечення температурного режиму біореакторів

Тепловий режим є визначальним фактором інтенсивності біохімічних перетворень. Існуючі методи обігріву біогазових реакторів можна класифікувати за способом передачі теплоти на: **зовнішні теплообмінні сорочки** ("водяні сорочки"), що охоплюють корпус реактора; **внутрішні трубчасті теплообмінники** (змійовики, спіралі, ТЕНи), розташовані всередині робочого об'єму; **виносні теплообмінники типу "труба в трубі" або пластинчасті**, через які прокачується субстрат (рециркуляція через зовнішній контур підігріву); **комбіновані**, що поєднання декількох методів.

Системи із зовнішніми теплообмінними сорочками є ефективними лише для реакторів малого об'єму (до 100–200 м³). Зі збільшенням діаметра реактора питома площа поверхні теплообміну (відношення площі стінок до об'єму) зменшується, що унеможливорює підтримку заданої температури в центрі реактора без перегріву пристінних шарів [18]. Внутрішні трубчасті теплообмінники забезпечують кращий контакт із субстратом, проте мають суттєвий експлуатаційний недолік – інкрустація поверхонь (рис.1.1). У процесі роботи на гарячих трубах відбувається налипання частинок субстрату та кристалізація солей (струвітів), що утворює кірку з низькою

теплопровідністю [19]. Це призводить до різкого погіршення коефіцієнта теплопередачі та необхідності частішої зупинки реактора для очищення.



Рис.1.1. Розташування внутрішніх трубчастих теплообмінників і швидкохідної пропелерної мішалки

Джерело: [37]

Останнім часом набувають поширення методи прямого нагріву, зокрема інжекція пари або використання електричних нагрівачів. Однак інжекція пари призводить до розбавлення субстрату, а розміщення стаціонарних ТЕНів викликає локальне пригорання (коагуляцію білка) на їх поверхні через низьку швидкість руху рідини поблизу нагрівача [20].

У роботах [5, 6, 21] запропоновано концепцію електротепломеханічного перетворення, де нагрівальний елемент є одночасно і робочим органом мішалки (або інтегрований у нього). Такий підхід дозволяє інтенсифікувати тепловіддачу за рахунок вимушеної конвекції: обертання нагрітої поверхні запобігає утворенню пригару та забезпечує швидке розподілення тепла в об'ємі рідини. Проте, як зазначається в [21], для ефективної реалізації цього методу необхідне точне узгодження теплової потужності зі швидкістю обертання та реологічними властивостями середовища, що вимагає вдосконалених систем моніторингу.

1.2. Аналіз ефективності систем перемішування субстрату в біогазових установках

Перемішування субстрату в біореакторі є одним із найбільш енергоємних технологічних процесів, на який припадає від 40 до 55 % загального споживання електроенергії біогазовою станцією на власні потреби [22]. Основна мета перемішування полягає у забезпеченні контакту між мікроорганізмами та поживним середовищем, вирівнюванні температурного поля, запобіганні седиментації (осідання важких частинок) та флотації (утворення кірки).

За конструктивним виконанням та принципом дії системи перемішування поділяються на три основні групи: гідравлічні, пневматичні та механічні. Гідравлічні системи здійснюють перемішування шляхом рециркуляції збродженої маси за допомогою виносних насосів. Як зазначають автори [23], ефективність таких систем різко знижується зі збільшенням в'язкості субстрату та об'єму реактора, оскільки струмінь рідини швидко загасає, не охоплюючи віддалені зони резервуара. Пневматичні системи базуються на нагнітанні стисненого біогазу в нижню частину реактора (барботаж). Хоча цей метод не має рухомих частин всередині реактора, він є енергетично витратним через низький ККД компресорів і може призводити до спінування субстрату, що негативно впливає на роботу газовідвідної системи [24]. Найбільшого поширення набули механічні системи, які реалізуються у вигляді:

- тихохідних лопатевих мішалок (вертикальних або похилих) з великим діаметром лопатей. Вони створюють ламінарні потоки, що є сприятливим для біоценозу бактерій, однак мають значну масу та потребують потужних редукторів.
- швидкохідних пропелерних мішалок (субмерсних/заглибних). Вони компактні, дозволяють регулювати напрямок потоку, проте створюють високі зсувні напруження, які можуть руйнувати конгломерати бактерій (рис.1.1) [37].

Суттєвим недоліком традиційних механічних мішалок із зовнішнім розташуванням приводу є наявність довгого валу, що проходить крізь стінку або купол реактора. Це створює проблеми з герметизацією: сальникові або торцеві ущільнення

в умовах агресивного середовища (сірководень, аміак) швидко зношуються, що призводить до витоків вибухонебезпечного біогазу [26].

Крім того, як показано в дослідженні [26], використання локальних джерел механічної енергії призводить до нерівномірного розподілу гідродинамічних швидкостей. У реакторах циліндричної форми при використанні однієї або двох мішалок неминуче утворюються застійні зони, де швидкість руху рідини наближається до нуля (рис.1.2).

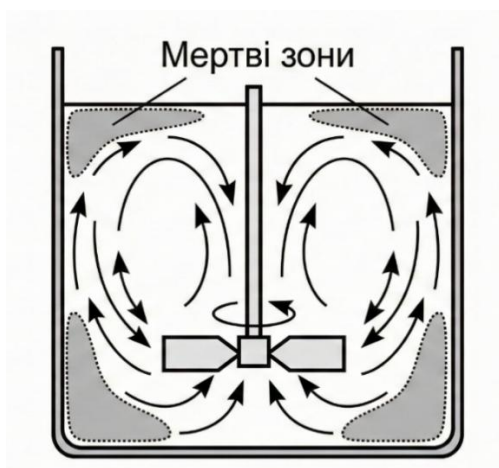


Рис. 1.2. Схема утворення "мертвих зон" у біореакторі при використанні традиційних мішалок

Джерело: розроблено автором

Це явище особливо характерне для субстратів з неньютонівськими (псевдопластичними) властивостями, в'язкість яких зростає при зменшенні градієнта швидкості зсуву.

1.2.1. Аналіз науково-технічної літератури за напрямом побудови заглибних електромеханічних перетворювачів для змішувачів біогазових реакторів

Заглибні електродвигуни для змішувачів біогазових реакторів – це спеціалізовані, які призначені для роботи в повністю зануреному стані в агресивних середовищах з високим вмістом сухої речовини, таких як анаеробні біореактори, придатних для температур експлуатації до 65°C. Зазвичай вони використовуються для гомогенізації субстрату, запобігання седиментації та розбиття плаваючих кірок для

максимізації виходу газу. Електродвигуни зазвичай мають потужність від 0,8 кВт до 30 кВт, причому більш потужні агрегати використовуються для високов'язких субстратів (понад 11% сухої речовини) та більших резервуарів. Електродвигуни мають рейтинг по енергоефективності IE3 – IE4, виготовляються з корозійностійких матеріалів, таких як нержавіюча сталь (наприклад, AISI 304/316), повинні мати сертифікат водонепроникності та вибухозахисту (наприклад, АТЕХ Зона 1) через наявність біогазу. Змішувачі часто кріпляться до вертикальних напрямних щогл за допомогою лебідок, що дозволяє регулювати висоту залежно від рівня заповнення.

Провідні фірми - виробники заглибних змішувачів і електродвигунів:

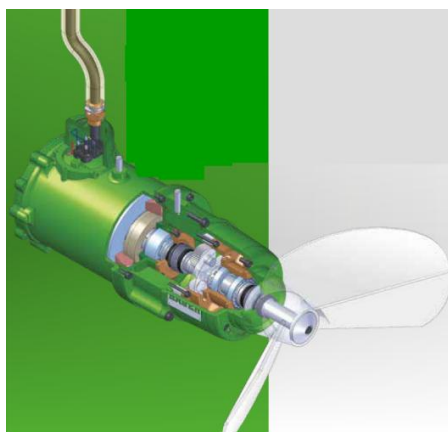
- SUMA Rührtechnik GmbH [11] пропонує занурювальні змішувачі OPTIMIX (наприклад, 2G, 2A) для біогазових установок з потужністю двигуна від 0,8 до 25 кВт, з оцинкованою або нержавіючою сталлю (рис.1.3,б).
- Landia Inc. постачає моделі POP-I та POD-I потужністю від 1,1 до 30 кВт, які розроблені для високого вмісту сухої речовини.
- Anaergia Technologies GmbH виробляє модель PSM XP з безредукторним синхронним двигуном, що має підвищений крутний момент.
- RECK Agrartechnik виробляє модель ORKA-EX для цілеспрямованого перемішування при температурах до 65°C.
- Zorg Biogas GmbH виробляє і змішувачі потужністю 11 кВт та 18,5 кВт (серія TZR), оснащені покращеною гідравлікою пропелера для високої тяги при низькому споживанні енергії.
- Börger GmbH виробляє B-MX, який всмоктує рідину збоку та проштовхує її через змішувальний тунель, ідеально підходить для рециркуляції.

Трифазний заглибний двигун фірми BAUER [12] має термічний захист обмотки (PTC-резистор) та пристрій захисту фаз і є стійким до перенапруги та низької напруги, а також до перевантаження (рис.1.3, а). Використовується спеціально розроблене ущільнення валу.

Змішувач компанії RECK ORKA-EX (рис.1.3,в) розроблений для перемішування або гомогенізації біомаси на біогазових установках і характеризується повільним і рівномірним перемішуванням [13]. Глибина занурення занурювального

моторного змішувача регулюється індивідуально (максимум 10 метрів). RECK пропонує одну Моделі ORKA-EX відповідають групі вибухонебезпечності II В.

Потужність двигуна $P = 5,5-18$ кВт, швидкість обертання гвинта: $n = 370$ об/хв, передавальне число $i = 3,95$, діаметр гвинта $D = 430-600$ мм. Електродвигун оснащений блоком керування з плавним пуском і автоматичним інтервальним таймером.



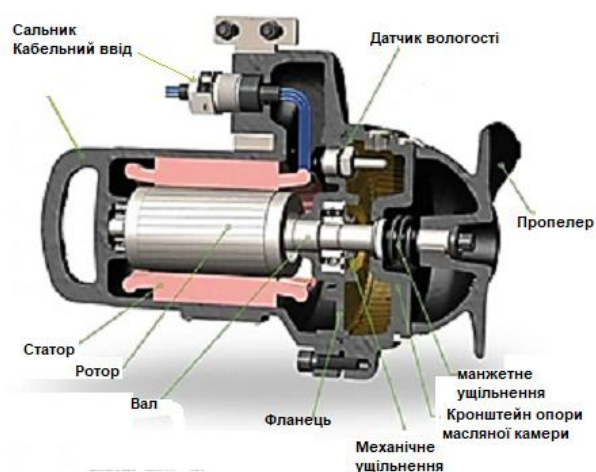
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.3. Змішувачі з заглибними електродвигунами для перемішування або гомогенізації біомаси на біогазових установках: а - фірми BAUER, б- фірми SUMA Rührtechnik GmbH, в- фірми RECK ORKA-EX, г- фірми DRX

Змішувачі фірми DRX (рис.1.3, г) мають широкий спектр застосування, включаючи процес гомогенізації на очисних спорудах стічних вод. Конструктивні

особливості: Основні компоненти виготовлені з чавуну EN GJL-250. Асинхронний 4-полюсний двигун має тепловий захист, вбудований в обмотку, клас ізоляції F 155°, захист IP68; напругу 220 В / 380 В \pm 5%; частота 50 Гц \pm 2%. Двигун охолоджується рідиною, в яку занурений змішувач. Межі використання: максимально допустима температура рідини до 60°C, допустиме значення рН 6-10; максимальний вміст твердих речовин у рідині 10 кг / м³. З боку гвинтового ротора вал двигуна захищений двоступеневим переднім ущільненням з проміжною масляною камерою. Датчик наявності води в масляній камері сигналізує про наявність води в кількості, що перевищує допустиму. У більшості випадків механічні торцеві ущільнення, що використовуються в занурювальних змішувачах, забезпечують повну герметичність. Однак виробники ущільнень залишають за собою можливість виникнення мінімальних витоків за певних обставин. Невелика кількість води розчиняється в оливі або створює емульсію, яка надалі ідеально взаємодіє з ущільненнями. Більша кількість води, яку олива більше не здатна поглинати, накопичується в нижній частині камери і також не впливає на роботу ущільнень. Вода з витоків ущільнень видаляється під час періодичної заміни оливи.

1.2.2. Заглибні змішувачі з електродвигунами, які оснащені суцільними та зовнішніми роторами

На відміну від стандартних двигунів із внутрішнім ротором, ці агрегати використовують зовнішній обертовий корпус, що забезпечує високу щільність крутного моменту та здатність працювати на нижчих обертах для забезпечення оптимального потоку шламу, часто при цьому самоохолоджуючись навколишнім середовищем. Діапазон потужності коливається від 0,8 кВт до 25 кВт. Конструкція розроблена для високої тяги (циркуляційної потужності), а не для високої швидкості, що ідеально підходить для запобігання твердому осадженню у в'язких субстратах. Зовнішній ротор, перебуваючи в безпосередньому контакті зі шламом, ефективно охолоджується, що робить їх придатними для безперервної роботи. Оснащені самоочисними дво- або трилопатевиими профілями пропелерів, виготовленими з

нержавіючої сталі (ss304/ss316). Для захисту двигуна в агресивних середовищах використовуються надійні системи ущільнення, такі як механічні ущільнення з карбіду кремнію (SiC/SiC). Змішувачі зазвичай встановлюються на вертикальних напрямних щоглах, що дозволяє регулювати їх висоту або повертати (на 360° у деяких моделях) для досягнення всіх зон резервуара, утримання твердих речовин у суспензії, сприяючи розкладанню мікроорганізмами. Оптимальне розташування двигуна та змішувача може покращити збір біогазу, що утворюється під час процесу ферментації.

У дослідженні [71] представлено безщітковий двигун постійного струму з постійними магнітами, «мокрим» зовнішнім ротором і ізоляційною втулкою, що відділяє оливу від обмотки. Для швидкої та точної оцінки втрат двигуна WER-PMBLDC було створено аналітичну модель крутного моменту збивання при різних коефіцієнтах занурення в оливу на основі теорії пограничного шару, розподілу потоку зсуву, а також двофазної моделі олива-повітря. Поле потоку було перевірено за допомогою CFD-моделювання і підтверджено експериментами на виготовленому прототипі зовнішнього роторного збовтувача. У дослідженні [72] здійснено аналіз багатофазних електричних двигунів та пов'язаних з ними контролерів для керування підводними платформами, а також запропоновано компактне та ефективне рішення прямого електроприводу завдяки інтеграції лопатей гвинта безпосередньо на ротор. Відомі конфігурації [73-75], коли обмотки статора розташовані всередині обертового вузла, що забезпечує безперебійну передачу крутного моменту та усуває необхідність у додаткових механічних зв'язках. Постійні магніти в маточині ротора забезпечують рух, спрощуючи герметизацію для зовнішньо встановлених рушіїв.

Під час розробки нової конструкції електродвигуна задля підвищення його енергоефективності необхідно прагнути до максимального використання його поперечного перерізу з урахуванням технологічних особливостей виготовлення, експлуатації, енергетичних параметрів і ступеню використання активних матеріалів. На наведених в роботах [76 -78] прикладах проектного синтезу, зокрема заглибного асинхронного двигуна з безшихтованими магнітопроводами, обґрунтовано доцільність застосування двигунів інноваційних конструкцій для підвищення їхньої

енергоефективності. З метою підвищення ефективності використання як електричних, магнітних, так і механічних властивостей матеріалу ротора в усьому його перерізі здійснено перехід від конструкції ротора з шихтованих листів електротехнічної сталі до конструкції у вигляді суцільного сталевого елемента. Завдяки поєднанню під час реалізації проектування спеціалізованої конструктивної схеми виконання ротора, досягнень в області сучасних технологій та матеріалів, а саме використання суцільного магнітопроводу з магнітно-м'якого композиту Somaloy 130i 5p, виготовленого за технологією порошкової металургії, розроблених математичних засобів проектування зі створенням параметризованих польових математичних моделей асинхронних двигунів вдалося спроектувати заглиблений асинхронний двигун на базі ПЭДВ 2.8-140 з суттєвим покращенням його пускових властивостей.

Для регулювання швидкості асинхронних двигунів широко використовується технологія ШІМ-перетворення частоти [79 - 84], але вихідна напруга та струм містять масу вищих гармонік, що має суттєвий вплив на ефективність асинхронного двигуна [85-87]. Для розрахунку втрат асинхронного двигуна, що живиться від напівпровідникового перетворювача широко використовується MATLAB Simulink [88 - 90] і програмне забезпечення Ansoft для створення симуляційної моделі, проведення гармонійного аналізу форми хвилі вихідної напруги перетворювача, розрахунків втрат в різних частинах осердя. Стандарт IEC/TS 60034-2-3 «Спеціальний метод випробувань для визначення втрат та ефективності асинхронних двигунів змінного струму зі змінною частотою», розроблений Міжнародною електротехнічною комісією, є найавторитетнішим стандартом для вимірювання втрат та ефективності потужності асинхронних двигунів зі змінною частотою. У роботах [91-98] порівняно методи розділення втрат згідно з IEC 60034-2-1 версії 2 та IEC/TS 60034-2-3 з запропонованими новими моделями ефективності асинхронного двигуна та використано новий простий метод експерименту на місці. У роботах [99 - 107] було досліджено стратегію оптимізації керування енергоефективністю двигуна зі змінною частотою, яка стала основою для дослідження ефективності асинхронного двигуна, що живиться від перетворювача частоти.

Однак теорія втрат двигуна зі змінною частотою, особливо теорія додаткових втрат, все ще недостатньо розвинена, тому вкрай необхідно проводити експериментальні дослідження. Перспективним напрямом розв'язання проблем ефективності процесів перемішування, нагріву і створення умов додаткових фізичних впливів на субстрат є використання заглиблених електромеханічних перетворювачів, які розташовуються безпосередньо в реакційному об'ємі. Це дозволяє виключити довгі вали та складні ущільнення, а також наблизити джерело руху до зон можливого застою. Інтеграція функцій нагрівання в робочий орган перемішувача (концепція поліфункціонального електромеханічного перетворювача) дозволяє підвищити енергоефективність і додатково знизити в'язкість субстрату в пограничному шарі, що покращує гідродинамічні характеристики системи.

1.2.3. Огляд досліджень суміщених систем нагріву, перемішування і омагнічування субстрату

На сьогоднішній день існує велика кількість методів та технічних засобів для перемішування і нагріву субстрату [108].

Доведено, що на споживану потужність мішалки мають суттєвий вплив її геометричні параметри та частота її обертання [109].

Лопаті мішалки потрібно розміщувати під кутом 45° , адже саме при такому нахилі лопатей у замкненому резервуарі виникає складний рух речовини – тангенціальний, радіальний та осьовий. Таке перемішування забезпечує інтенсифікацію утворення біогазу та підвищує рентабельність біогазової установки. Поряд з цим, не завжди температура, яка створена дією бактерій, буде достатня для оптимального процесу зброджування. У роботі [110] запропоновано встановити в лопаті мішалки нагрівальний кабель для досягнення оптимальної температури в біореакторі. Авторами встановлено раціональну частоту обертання робочого органу електротепломеханічної системи. Крім того, нагрівальний кабель при протіканні струму буде створювати магнітне поле, що може впливати на процеси в біореакторі. Відомі дослідження магнітного поля кабельних систем електрообігріву підлог

житлових приміщень [111]. В роботі [112] з метою визначення впливу електромагнітного поля на водневий показник рН, електричний опір та електрорушійну силу під час ферментації свинячого гною в анаеробних умовах було проведено експериментальні дослідження за мезофільної температури та періодичного перемішування. Обертове магнітне поле з частотою 50 Гц та ефективною магнітною індукцією 3,5 мТл створювалося індуктором, який вмикався двічі на день на 15 хвилин. Проведені експерименти з низькочастотним обертовим магнітним полем показали можливості формування двох напрямків: виробництво біогазу з високою часткою метану шляхом стимуляції метаногенних бактерій; скорочення часу ферментації. Під впливом магнітного поля активуються додаткові механізми для підвищення електропровідності субстрату і збільшення концентрації гідроксильних іонів під час дисоціації водної фази субстрату.

Метою досліджень [52] було вивчення угруповань бактерій та архей під час анаеробного зброджування стічних вод молочних заводів, виробництво біогазу в реакторах, що живляться гноєм великої рогатої худоби [113], ефекту посилення анаеробного розщеплення біомаси водоростей [51]. Субстрати випробували при різних інтенсивностях статичного магнітного поля з індукцією в діапазоні 8,1- 420 мТл і регулюванні часу впливу магнітного поля. Автори спостерігали збільшення накопиченого виходу біогазу в реакторах (майже в 2 рази) і вмісту метану (на 20%) в біогазі наприкінці експерименту у порівнянні з реакторами без впливу магнітного поля. Приклади вищезгаданих досліджень свідчать про те, що для субстратів з високим загальним вмістом твердих речовин слід застосовувати вищу інтенсивність магнітного поля. Автори роботи [114] запропонували три способи дії магнітного поля на ферментативну активність мікроорганізмів під час денітрифікації.

В роботах [115,116] представлені результати досліджень багатофазних систем, підходи до CFD-моделювання, моделі турбулентності та моделі балансу популяції бактерій. Доведена необхідність контролю швидкості змішування та напруження зсуву мас субстрату в перехідних режимах, щоб уникнути руйнування живих організмів під впливом механічної дії змішувального пристрою. Пошкодження клітин спостерігаються навіть при низькій швидкості зсуву $0,12 \text{ c}^{-1}$, де порогова швидкість

кінчика крильчатки перевищує 1,56 м/с та між 2,45 та 2,89 м/с відповідно при зсувному напруженні понад 0,3 Па.

Експериментально було встановлено значення напруженості магнітного поля, що впливає, для поліпшення умов анаеробної переробки оленього гною та збільшення швидкості та обсягів виходу метану [48]. Ефективним методом дезінтеграції активного мулу є комбінована попередня обробка магнітним полем та мікропухирцями CO_2 [49]. В роботі [50] досліджено вплив факторів магнітного впливу, таких як статичне магнітне поле, магнітні наночастинки та звичайні магнітні частинки, на анаеробне зброджування муніципального зневодненого мулу. У поєднанні з бактеріями магнітні наночастинки можуть ефективно збільшувати вихід газу, вміст метану та скорочувати період анаеробного зброджування. Відомі дослідження впливу постійного магнітного поля на ефективність анаеробного зброджування біомаси водоростей [51]. Стічні води виробництва молочних продуктів характеризуються високою концентрацією органічних сполук і зазвичай використовуються виробництва енергії. Методи збільшення виробництва біогазу включають застосування намагнічувальних пристроїв на варильному казані для створення магнітного поля [52]. У статті [53] виконано критичний аналіз доступної наукової літератури про вплив полів на мікроорганізми та про контрасти встановлених біологічних ефектів.

Як впливає з залежностей [54] магнітне поле сприяє підвищенню швидкості хімічних реакцій, розчинності солей і кислот, впливає на окислювально-відновний потенціал (ОВП) середовища.

Тому, незважаючи на швидкий розвиток біогазових технологій, залишається актуальним питання синергетичного підходу до розгляду впливу суміщених процесів перемішування, нагрівання та впливу магнітного поля на процес анаеробного зброджування біомаси у біогазових установках.

1.3. Огляд систем моніторингу та автоматичного керування параметрами біореактора

Ефективність керування біотехнологічним процесом безпосередньо залежить від точності та репрезентативності вимірювальної інформації. Стандартний набір контрольованих параметрів БГУ включає: температуру субстрату, рівень рН, тиск газу, рівень рідини, концентрацію метану в біогазі.

У переважній більшості існуючих установок датчики температури встановлюються в гільзах, вварених у стінки реактора на різній висоті. Таке розміщення дозволяє контролювати температуру лише в пристінному шарі, яка через тепловтрати через корпус може відрізнитися від температури ядра реактора на 2–5 °С [29]. Відсутність інформації про об'ємний розподіл температури не дозволяє системі керування адекватно реагувати на виникнення зон локального перегріву або переохолодження.

Ще складнішою задачею є контроль в'язкості субстрату. Зміна складу сировини призводить до зміни її реологічних властивостей, що впливає на навантаження на мішалки та умови теплообміну. Промислові віскозиметри є дорогими та складними в обслуговуванні, тому на практиці в'язкість зазвичай не вимірюють, а режим перемішування встановлюють за фіксованим алгоритмом (наприклад, 15 хв роботи / 45 хв паузи), що є енергетично неоптимальним [30].

У роботі [36] запропоновано інноваційний підхід до моніторингу – використання «розумного» заглибного перетворювача. Оскільки перетворювач активно переміщується або обертається в середовищі, датчики, встановлені на його поверхні, можуть сканувати температурне поле в різних точках об'єму. Головною технічною проблемою реалізації такого підходу є передача сигналу з рухомої частини, що знаходиться в герметичному, агресивному та вибухонебезпечному середовищі. Використання контактних струмознімачів є неприпустимим через іскроутворення. Тому актуальним є застосування бездротових технологій передачі даних та енергії (індуктивна передача, радіоканал), що і було реалізовано в дослідженнях.

Поєднання розподіленого температурного моніторингу та непрямого контролю реології створює передумови для переходу до адаптивних систем автоматичного керування БГУ, які здатні забезпечити максимальний вихід біогазу при мінімальних енерговитратах.

1.4. Аналіз патентної та науково-технічної літератури за напрямом автоматизації біогазових комплексів

Аналіз патентної документації провідних країн світу (Німеччина, США, Китай, Україна) свідчить про значний інтерес до вдосконалення конструкцій біореакторів. Проте, лівова частка технічних рішень (близько 70 %) стосується вдосконалення механічної частини мішалок, систем завантаження сировини або конструкції куполів газгольдерів [31]. Питанням інтелектуального моніторингу та автоматизованого керування приділяється значно менше уваги, що створює технологічний розрив між складністю біохімічних процесів та примітивністю засобів керування ними.

Існуючі способи контролю процесу анаеробного бродіння, захищені патентами, переважно базуються на лабораторному аналізі відібраних проб. Наприклад, відомі системи, де проби субстрату автоматично відбираються з реактора і подаються на зовнішній аналізатор [32]. Недоліком таких систем є їх висока вартість, складність обслуговування (необхідність промивки пробовідбірників) та дискретність отримання даних (значний час запізнення реакції системи керування).

У сегменті автоматичного керування перемішуванням відомі рішення, де режим роботи мішалки прив'язується до виходу біогазу: при зниженні інтенсивності газоутворення інтенсивність перемішування збільшується. Однак, як зазначається в [33], такий підхід є реактивним, а не превентивним. Зниження газовиділення є наслідком порушення процесу, яке відбулося раніше, тому керування "по факту" часто запізнюється.

Окрему групу складають винаходи, спрямовані на контроль в'язкості субстрату. Більшість з них пропонує встановлення ротаційних віскозиметрів у потоці

рециркуляції. Проте в умовах гетерогенного середовища (наявність соломи, твердих включень) такі датчики швидко забиваються і дають похибку.

Перспективним напрямом, який простежується в останніх наукових публікаціях та патентах, є використання непрямих методів контролю ("soft sensors"). Зокрема, моніторинг навантаження на електропривод мішалки може слугувати індикатором зміни реологічних властивостей середовища. Однак відомі рішення часто обмежуються лише вимірюванням струму статора, що не дає повної картини енергетичних процесів, особливо при роботі перетворювача в режимах частотного регулювання [34].

Важливо зазначити, що більшість розглянутих аналогів розглядають системи керування, перемішування та нагрівання як окремі, незалежні підсистеми (рис.1.3).

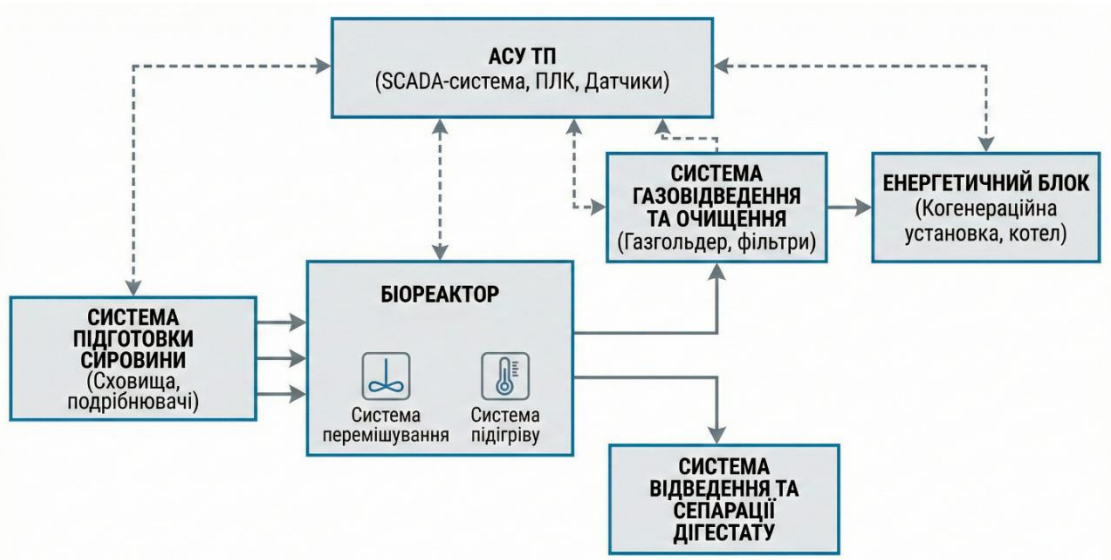


Рис. 1.3: Структурна схема взаємодії підсистем у сучасній біогазовій установці
Джерело: розроблено автором

Відсутність комплексного підходу, де параметри мікроклімату (температура, вологість в газовому просторі), реологічні параметри субстрату та параметри електромеханічного перетворювача (як джерела тепла і руху) оброблялися б єдиним контролером, знижує ефективність керування.

Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналізу науково-технічної літератури, патентних джерел та досвіду експлуатації біогазових установок можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що ефективність біогазових технологій стримується недосконалістю методів забезпечення температурного та гідродинамічного режимів у реакторах. Існуючі системи зовнішнього обігріву та механічного перемішування характеризуються високою енергоємністю, нерівномірністю температурних полів та наявністю гідродинамічних зон застою (до 25–30 % робочого об'єму), що призводить до зниження виходу біогазу.

2. Виявлено протиріччя між необхідністю точного підтримання температури (з точністю до 0,5–1,0 °C для термофільного режиму) та відсутністю технічних засобів для моніторингу температури в ядрі реактора. Стаціонарні датчики на стінках не відображають реального стану процесу в усьому об'ємі неньютонівської рідини.

3. Показано перспективність використання заглибних поліфункціональних електромеханічних перетворювачів, які поєднують функції джерела теплової енергії та перемішування. Такий підхід дозволяє інтенсифікувати теплообмін та наблизити джерело впливу до зони реакції, проте вимагає розробки спеціалізованих методів керування.

4. Аналіз засобів автоматизації показав відсутність на ринку доступних комплексних систем, які б здійснювали моніторинг параметрів середовища безпосередньо в зоні перемішування та використовували параметри електромеханічного перетворювача (струм, потужність) для непрямой оцінки в'язкості субстрату.

5. Обґрунтовано необхідність створення електротехнічного комплексу, що включає заглибний поліфункціональний перетворювач та систему бездротового моніторингу і автоматичного контролю. Це дозволить реалізувати адаптивні алгоритми керування, підвищити енергетичну ефективність процесу та забезпечити безаварійну роботу обладнання.

Розв'язанню цих задач присвячені наступні розділи дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА

2.1. Концепція побудови електротехнічного комплексу

Підвищення енергетичної ефективності та рентабельності біогазових установок нерозривно пов'язане з удосконаленням методів керування технологічним процесом метаногенезу. Як показав аналіз, проведений у першому розділі, 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.

Для розв'язання науково-прикладної задачі у дисертаційній роботі пропонується концепція побудови інтегрованого електротехнічного комплексу, який об'єднує функції активного термомеханічного і магнітного впливу на субстрат та розподіленого інтелектуального моніторингу. Архітектура комплексу базується на синергетичній взаємодії двох функціональних підсистем:

Заглибний поліфункціональний електромеханічний перетворювач (ПЕМП) – виконавчий механізм, що розташовується безпосередньо у робочому об'ємі реактора та забезпечує одночасне перемішування, нагрівання, омагнічування середовища (субстрата) та просторовий моніторинг температури і швидкості обертання 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.

Складовими частинами загальної концепції, які конкретизують підходи до розв'язання задач, є такі:

Підконцепція електротепломеханічного перетворення енергії в ПЕМП.

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 індуються потужні вихрові струми (струми Фуко), які призводять до його нагрівання і одночасно 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 унеможливорює пригорання (коагуляцію) біомаси на робочих органах, навіть при значних питомих теплових навантаженнях. Не менш важливою функцією ПЕМП є

вплив його зовнішнього магнітного поля на процеси метаногенезу через дію на бактеріальну спільноту та водну компоненту.

Підконцепція бездротового внутрішнього моніторингу. Другою функцією ПЕМП 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). Його первинна обмотка розташована на нерухомому статорі, а вторинна – 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.

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.

Системна інтеграція та керування. Об'єднання ПЕМП 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 (від ПЕМП), непряму оцінку в'язкості субстрату (через аналіз електромагнітних параметрів статора ПЕМП) та точні дані про фізико-хімічний стан субстрата (від ПАК). На основі цієї інформації формуються керуючі впливи на обмотку статора ПЕМП (зміна частоти та амплітуди напруги живлення), що дозволяє гнучко варіювати співвідношення між тепловою та механічною потужністю, магнітним впливом, а також на приводи ПАК для коригування частоти вимірювань.

В загальній структурі електротехнічного комплексу передбачено також **зв'язок** між результатами оцінки стану процесу метаногенеза, тобто результатами моніторингу, не тільки з **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. При цьому синергетичний ефект у вигляді збільшення виходу біогазу під час ферментації соломи кукурудзи та ріпаку посилюється за рахунок енергетичної ефективності процесу екструзії, технології й обладнання для попередньої обробки сировини і води магнітним полем [39].

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 реактора.

2.2. Конструктивні рішення і устаткування електротехнічного комплексу для здійснення автоматичного управління параметрами процесу анаеробного бродіння

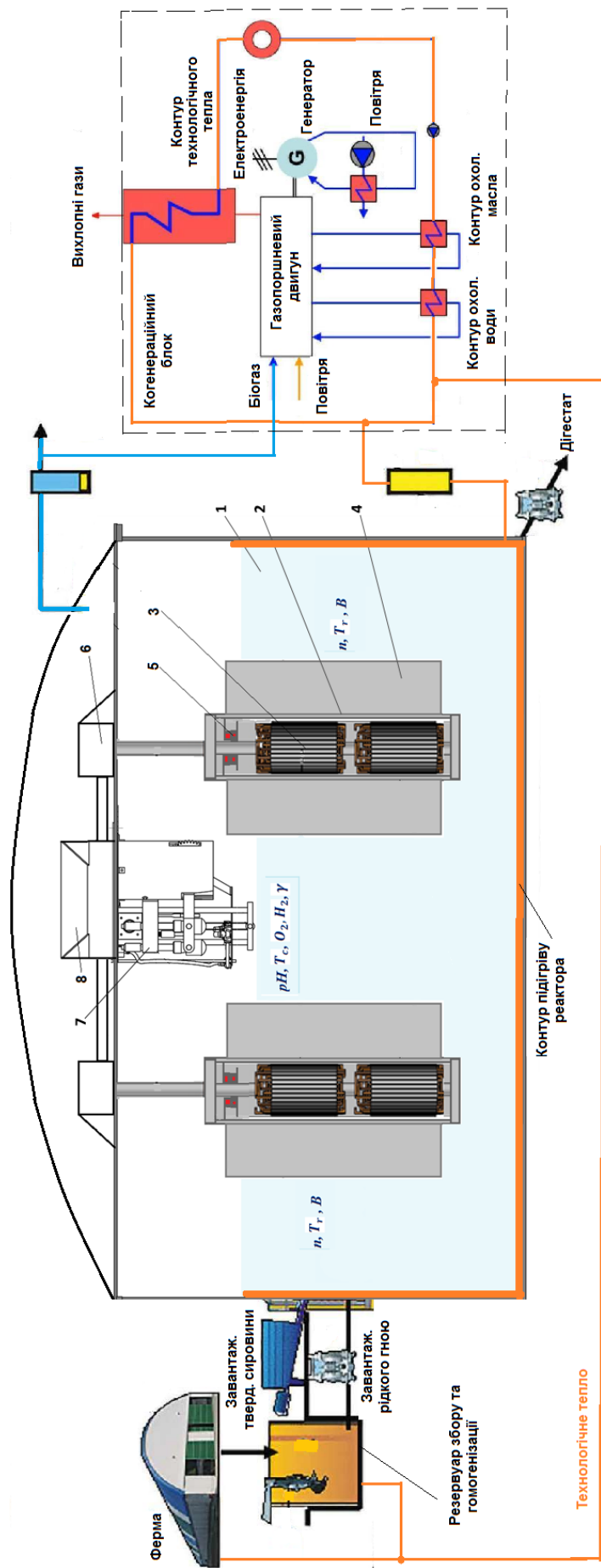
При формуванні системи управління, яка виконує моніторинг і дозволяє оптимізувати роботу ПЕМП, поставлена задача забезпечення енергетичної ефективності, рівномірності температурного поля й інтенсифікації процесу анаеробного бродіння, використання дисипативної складової енергії приводу, контролю та управління кислотно-лужним балансом, а також оптимальних швидкостей перемішування як субстрата з низькою концентрацією сухої речовини, так і важких субстратів, що не руйнують колонії бактерій в процесах анаеробного бродіння промислових біогазових установок. На рис.2.1 показано розміщення устаткування електротехнічного комплексу для здійснення автоматичного управління параметрами процесу анаеробного бродіння.

Устаткування електротехнічного комплексу містить біореактор 1 з субстратом, вибухобезпечний ПЕМП 2, виконаний у вигляді двох статорів 3, розташованих на вертикальній порожнистій осі, порожнистого феромагнітного ротора 4 з лопатями, обертового трансформатора 5 для моніторингу параметрів ПЕМП, а саме частоти обертання, температур і магнітної індукції (n, T_r, B). ПЕМП закріплений на кришці біореактора за допомогою вузла 6 і підключений до напівпровідникового перетворювача напруги (або частоти) чи трифазного автотрансформатора. На кришці біореактора також закріплено пристрій 7 автоматичного контролю параметрів біореактора ($pH, T_c, O_2, H_2, \gamma$) з розгалуженою системою датчиків та вибухобезпечний ізотермічний контейнер 8, в якому розміщена система керування електротехнічного комплексу. Електротехнічний комплекс (див. рис.2.1) інтегровано у систему виробництва електричної і теплової енергії з використанням когенераційної установки, побудованої на газопоршневому двигуні [117]. Частково вироблена електроенергія використовується для систем електропривода та автоматичного контролю електротехнічного комплексу, а також систем завантаження сировини у біогазовий реактор та вивантаження дігестату. Контур підігріву біореактора

технологічним теплом використовується при стартовому нагріву субстрата до температури відповідного режиму анаеробного бродіння і далі використовується лише при суттєвих зниженнях температури навколишнього середовища. В період циклу анаеробного бродіння (15-25 діб) функції підтримання необхідного температурного режиму, перемішування і омагнічування субстрату виконує заглибний ПЕМП.

Відповідно до закону регулювання на статори ПЕМП подається напруга певної амплітуди і частоти. Змінні обертові магнітні поля статорів 3 збуджують вихрові струми у порожнистому феромагнітному роторі 4, здійснюючі нагрів останнього. Одночасно від взаємодії обертального магнітного поля та вихрових струмів створюється електромагнітний момент, який приводить до обертання порожнистий феромагнітний ротор 4 з лопатями. На відповідних ділянках ротора формуються ЕРС і струми певної частоти, від величини яких залежить глибина проникнення і енергія електромагнітного поля. Отже, стає можливим регулювання швидкості, інтенсивності тепловиділень, а також здійснення реверсивного режиму обертання порожнистого феромагнітного ротора 4 для створення сприятливих умов анаеробного процесу як у мезофільному, так і у термофільному режимах. На зовнішній поверхні порожнистого феромагнітного ротора 4 діє також низькочастотне магнітне поле, амплітуда якого може регулюватись в межах від 5 до 65 мТл, а частота – від 3 до 55 Гц, подаванням на статори 3 квазічастотної напруги від напівпровідникового перетворювача.

Біогаз є продуктом обміну речовин бактерій, що утворюється внаслідок розкладання ними органічного субстрату в 4 етапи з різним рівнем рН. Бактерії найбільш активні в середній зоні. Тому вміст резервуару необхідно періодично перемішувати, бажано до шести разів. Однією з переваг запропонованого електротехнічного комплексу є те, що за допомогою ПЕМП субстрат змішується та рівномірно прогрівається за рахунок значно вищого коефіцієнта тепловіддачі поверхні нагрівання у порівнянні з нерухомою системою теплообмінників. Окислювально-відновний потенціал являє собою ступінь готовності іонів приймати електрони. Для росту анаеробних бактерій цей потенціал повинен



1- біореактор з субстратом, 2 - вибухобезпечний ПЕМП, 3 - статори, 4- феромагнітний ротор з лопотями, 5 - обертовий трансформатор, 6 - вузол підключення до джерела живлення
7 - пристрій автоматичного контролю параметрів біореактора, 8 - вибухобезпечний ізотерічний контейнер

Рис.2.1.1. Устагкування електротехнічного комплексу для здійснення автоматичного управління параметрами процесу анаеробного бродіння
Джерело: розроблено автором

знаходиться на дуже низькому рівні (-0,1V). В той час, як гідролізуючі і кислотоутворюючі бактерії в кислому середовищі з рівнем рН 4,5-6,3 досягають оптимуму своєї активності, бактерії, що утворюють оцетову кислоту і метан можуть жити тільки при нейтральному або слаболужному рівні рН 6,8-8 . Для всіх бактерій дійсним є наступне: якщо рівень рН перевищує оптимальний, то вони стають повільніше у своїй життєдіяльності, що уповільнює утворення біогазу. Для одноступінчатих технологій слід витримувати рівень рН для метаноутворення, тобто близько 7. На рівень рН можна впливати кількістю субстрату, що додається і його видом, але заміри рН, відстають від реальної ситуації. Більш ефективним є безпосередній вимір буферних властивостей, тобто окислювально-відновлювального потенціалу (ОВП) [47]. За результатами виміру окислювально-відновлювального потенціалу мікроконтролер може формувати регулюючий сигнал заборони на відкривання шиберної засувки, або рекомендований різновид свіжої біомаси при поповненні резервуару. Але основною метою вимірювання ОВП є визначення рівня, частоти і періодичності необхідного впливу на субстрат магнітного поля, створюваного ПЕМП.

До обмежувальних умов належить максимальна температура поверхні нагрівника, тобто поверхні порожнистого феромагнітного ротора 6, яка не повинна перевищувати 60°C. Програма мікроконтролера передбачає переважну кількість включень ПЕМП для перемішувань субстрату з підвищеною тепловою і механічною потужністю тільки в періоди дії нічного тарифу по електроенергії. У денний період споживана потужність ПЕМП зменшується до рівня, який забезпечує в основному механічні втрати на перемішування, а основна частина теплової енергії покривається за рахунок запасеного тепла теплоакumuлюючого матеріалу, яким рекомендовано заповнювати внутрішню порожнину ПЕМП. Теплоакumuлюючий матеріал доцільно вибирати з температурою фазового переходу 62- 70 °С і питомою ентальпією плавління не нижче 304 Дж / г.

2.3. Ключові аспекти побудови поліфункціонального електромеханічного перетворювача енергії для перемішування, нагріву та омагнічування субстрату

Принципи функціональної і структурної інтеграції. З погляду функціонального аналізу, об'єкт дослідження відноситься до класу суміщених електромеханічних систем з поліфункціональними властивостями, оскільки процеси перетворення енергії здійснюються з використанням чотирьох видів енергії: електричної, магнітної, механічної і теплової. Структура заглибного ПЕМП поєднує електромеханічний перетворювач, виконавчий орган, джерело теплової енергії та пристрій для омагнічування субстрату.

Принципи інтеграції теплових процесів. Метою інтеграції теплових процесів є формування можливостей відбору тепла від джерел втрат в ПЕМП, координація теплових потоків, сформованих при цільовому перетворенні електроенергії в теплову і каналізація останньої до внутрішнього об'єму біореактора, де потрібний нагрів субстрату. Основним є *принцип координації температурного градієнта*. Швидкість передачі тепла визначається диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

де z – координата по лініях зв'язку активних частин ПЕМП і об'єму з субстратом; α - коефіцієнт температуропровідності; T – температура.

З іншого боку, перевагою ПЕМП є *формування випереджаючого теплового потоку, який формується у зовнішньому масивному ротора за рахунок електромагнітного поля, що створює вихрові струми*. Нестационарний процес зміни напруженості H цього поля визначається диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\rho}{\mu_0 \mu} \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

де ρ - питомий опір; μ_0, μ - магнітна постійна і відносна магнітна проникність відповідно.

Коефіцієнти α і $\rho/\mu_0\mu$ в рівняннях (2.1), (2.2) характеризують швидкості розповсюдження T і H відповідно і мають однакову розмірність, але відрізняються, наприклад, для сталі залежно від марки в 100-1000 разів. Оскільки електромагнітна хвиля розповсюджується значно швидше, цим забезпечується створення випереджаючого теплового потоку. Другим принципом інтеграції теплових процесів є *принцип забезпечення замкнутості теплових ланцюгів в системі ПЕМП - субстрат: елементи конструкції, активні частини, теплообмінні поверхні і навантажувально-охолоджуюче середовище (субстрат), як елемент ПЕМП, взаємозв'язані таким чином, що утворюють замкнутий тепловий ланцюг, а вся тепла енергія, що виробляється в ПЕМП, шляхом прямої теплопередачі або рекуперації витрачається на приріст ентальпії субстрату.*

Принцип саморегуляції при розподілі на складові корисної потужності.

Даний принцип визначає механізм пайового розподілу електромагнітної потужності ПЕМП на три корисні потоки вихідної потужності: потік механічної потужності, потік теплової потужності та потужність зовнішнього магнітного поля.

Розглянемо три характерні стани заглибного ПЕМП, розміщеного в біореакторі (рис. 2.1), який містить в загальному випадку 2 статорні модулі, що працюють на один ротор: А – нерухомий стан масивного ротора ($S = 1$), штучний режим стоянки під струмом відповідно до вимоги технологічного процесу; Б – стан прискореного обертання ротору ($\frac{dn}{dt} > 0$); В – квазістаціонарний режим по частоті обертання ($\frac{dn}{dt} = 0$). Субстрат виступає в двох якостях: механічне навантаження для ротора ПЕМП, що створюється силами в'язкого тертя матеріалу; охолоджуюче середовище, яке омиває зовнішній порожнистий феромагнітний ротор (ПФР).

Стану А відповідає нерухомий ротор, коли електромагнітна потужність двигунового P_{ED} і гальмівного модулів P_{ET} , які працюють з різними напрямками обертового магнітного поля, переходить в теплову потужність, що виділяється в роторі, і енергію магнітного поля на поверхні ротора ПЕМП. Створюваний субстратом гальмівний момент M_C перевищує результуючий момент модулів ПЕМП. Крім того, проходження струму по статорним обмоткам супроводжується

джоульовими втратами P_{M1D} і P_{M1T} . Розрахунки вказаних потужностей можна вести за такими формулами:

$$P_{ED} = m_1 \cdot E_{1D} \cdot \cos \psi_{2D} \cdot \sqrt{\frac{1}{tc} \int_0^{tc} (I'_{2D})^2 dt} \quad (2.3)$$

$$P_{ET} = m_1 \cdot E_{1T} \cdot \cos \psi_{2T} \cdot \sqrt{\frac{1}{tc} \int_0^{tc} (I'_{2T})^2 dt} \quad (2.4)$$

$$P_{M1D} = m_1 \cdot \frac{1}{tc} \cdot \int_0^{tc} (I_{1D})^2 \cdot R_{1D}(t) dt \quad (2.5)$$

$$P_{M1T} = m_1 \cdot \frac{1}{tc} \cdot \int_0^{tc} (I_{1T})^2 \cdot R_{1T}(t) dt \quad (2.6)$$

$$W_M = \int \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r} dV \quad (2.7)$$

де E_{1D} , E_{1T} , I_{1D} , I_{1T} , I'_{2D} , I'_{2T} , R_{1D} , R_{1T} – ЕРС взаємоіндукції, первинні і приведені вторинні струми, активні опори статорів обмоток статорів відповідно двигунового (ДМ) і гальмівного (ГМ) модулів; t_c – час стоянки під струмом; B – нормальна складова магнітної індукції; μ_0 – магнітна стала; μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу ротора; V – об'єм, в якому зосереджене магнітне поле.

Вибір товщини ротора здійснюється за умови формування магнітного поля на поверхні ротора з індукцією в діапазоні 15 – 65 мТ шляхом наближення товщини ротора до значень глибини проникнення електромагнітного поля.

Знаходження струмів і активних опорів в підінтегральних виразах указує на температурний дрейф цих величин протягом часу t_c . Сумарна теплова енергія $W_{TH} = t_c (P_{ED} + P_{ET} + P_{M1D} + P_{M1T})$ визначається з умови $t_c \leq t_{пр}$, коли за період стоянки під струмом температура обмоток статорів не досягає граничного по класу нагрівостійкості ізоляції значення.

Стан Б прискореного обертання ротору спостерігається в період пуску і досягнення ротором ПЕМП усталеного режиму по швидкості. При цьому створюваний субстратом гальмівний момент M_C стає менше сумарного електромагнітного моменту обох модулів ПЕМП. В межах цього періоду можливе

регулювання потужності одного з модулів. При цьому електромагнітна енергія $W_{\text{ЭД}}$ в зазорі ДМ перетвориться в три інших види енергії: механічну $W_{\text{мех.д}}$, теплову $W_{\text{тп.д}}$ і енергію зовнішнього магнітного поля $W_{\text{м}}$.

Закон зміни ковзання в період часу від моменту рушання ротору ПЕМП до сталого значення швидкості. $(t_{\text{в}} - t_{\text{с}})$:

$$s_{\text{Д}} = \frac{1}{H_j} \int_{t_{\text{с}}}^{t_{\text{в}}} \{M_{\text{ЕМР}}(t) - M_{\text{С}}(t)\} dt \quad (2.9)$$

де H_j – інерційна постійна ротора ПЕМП; $M_{\text{ЕМР}} = M_{\text{ЕМ.Р}} \pm M_{\text{ЕМ.Г}}$ – результуючий електромагнітний момент ДМ і ГМ. Знак «+» - відповідає узгодженому обертанню ДМ і ГМ.

Значення ковзання для ГМ необхідно визначати відповідно до виразу [46]

$$s_{\text{Г}} = \frac{p_{\text{Г}}}{p_{\text{Д}}} (1 - s_{\text{Д}}) \pm 1 \quad (2.10)$$

де $p_{\text{Р}}$, $p_{\text{Г}}$ – число пар полюсів відповідно ДМ і ГМ. Знак «+» відповідає зустрічному, а «-» - узгодженому обертанню магнітних полів РМ і ГМ.

При нерухомому роторі (стан А) відведення тепла і передача його в периферійні об'єми субстрату здійснюється за допомогою теплопровідності відповідно до закону Фур'є

$$q_{\lambda} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.11)$$

де q_{λ} - питомий тепловий потік; λ - коефіцієнт теплопровідності.

Обертання ротора (стани Б, В) створює переважні умови для вимушеного конвективного теплообміну не тільки між ротором і прикордонною областю субстрату, але і в периферійних об'ємах субстрату відповідно до закону Ньютона

$$q_{\alpha} = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.12)$$

де $\alpha = \frac{1}{t_B - t_C} \int_{t_c}^{t_B} \alpha(t) dt$ - середній коефіцієнт тепловіддачі при конвективному

теплообміні протягом періоду розгону ротора або періоду його обертання зі сталою швидкістю. В стані Б, В виділяється менша кількість теплової енергії, чим в стані А $W_{ТП}^A > W_{ТП}^B$. Проте за рахунок посилення швидкості теплові потоки обох станів для різних видів субстрату практично однакові.

Принципи безредукторного забезпечення малої частоти обертання і кратного посилення моменту. В залежності від об'єму біореактора можуть застосовуватись конструктивні модифікації ПЕМП, які відрізняються кількістю застосованих статорів і активних зон загального ПФР. Безредукторне забезпечення малої частоти обертання ПФР для одномодульної конструкції (один статор) формується такими умовами: можливість регулювання вихідних параметрів джерела живлення; вибір радіального розміру змішувальних лопатей на роторі, при якому статичний момент субстрату в діапазоні рекомендованих частот обертання (60 –100 об/хв) дорівнював електромагнітному моменту ПЕМП.

ПЕМП, до складу якого входять як мінімум два (умовно двигунового і гальмівного) електромагнітні модулі, що складаються із статорів і активних зон загального ПФР, короткочасно, періодично або постійно працюють в одному з режимів: *узгоджений напрям відповідно прямих і зворотних м.р.с. синхронних магнітних полів модулів (форсований режим); протилежний напрям відповідно прямих і зворотних м.р.с. синхронних магнітних полів модулів, що створюють при взаємодії з вихровими струмами ПФР частоту обертання з 10...15-кратним зниженням по відношенню до синхронної без застосування механічного редуктора.*

Формування частотного спектру гармонік в повітряному проміжку ПЕМП.

Найбільш поширені варіанти конструкцій статоров ДМ і ГМ ПЕМА наступні: статорні обмотки ДМ і ГМ покладені у пази окремих магнітопроводів і виводами підключені до загальної мережі живлення. При цьому статор ГМ працює у режимі противімкнення; статори ДМ і ГМ покладені в загальних пазах. Обмотки індуктивно

не пов'язані, що досягається вибором відповідних кроків обмоток, обмеженням числа паралельних гілок і способом з'єднання фаз.

При підключенні обмотки ДМ до трифазної первинної мережі з частотою f , утворюється обертове $2p_d$ – полюсне поле Φ_d , під дією якого у масивному роторі протікають вихрові струми, створюється асинхронний момент і ротор обертається з частотою $n_p = n_l (1 - s_d)$, де $n_l = 60 f_l / p_d$ і s_d – ковзання ДМ. Частота струмів у роторі $-f_{2d} = f_l s_d$.

При підключенні до первинної мережі статорної обмотки ГМ утворюється $2p_T$ - полюсне поле Φ_T , яке наводить у масивному роторі ЕРС з частотою

$$f_{2T} = \frac{p_T}{60} (n_p \pm n_T) = \left[\frac{p_T}{p_d} (1 - s_d) \pm 1 \right] f_1 = s_T \cdot f_1. \quad (2.13)$$

Ковзання s_T ГМ визначається виразом (2.10). Знак «+» у виразах (2.10) та (2.13) відповідає зустрічному, а «-» - узгодженому обертанню полів Φ_d та Φ_T .

Основне поле ПЕМП доповнюється вищими гармонічними і таким чином формується спектр полів у просторі, де концентрується в основному енергія магнітного поля ПЕМП, а саме – у повітряному зазорі. ПЕМП у загальному випадку містить два і більше нерухомих статора із зубцевою зоною і трифазною обмоткою, що живляться від напівпровідникових перетворювачів, напруга на виході яких характеризується певним ступенем несинусоїдальності та містить парні і непарні гармоніки. Гармоніки, пов'язані з роботою тиристорів (симісторів), проникають на всю глибину ПФР, викликаючи додатковий нагрів. При несинусоїдній напрузі живлення вищі гармоніки (ВГ) напруги викликають додаткові втрати, що характеризуються потужністю спотворення[46]:

$$N_{BK}(t) = u \sqrt{\sum_{i=1}^z \sum_{k=1}^m \sum_{h=0}^{\infty} I_{nk}^2(t)}, \quad (2.14)$$

де I_{nk} – поточні діючі значення n -х гармонік струму в фазі « k » z -го модуля.

Як буде показано далі, наявність спектру гармонік не є критичним для ПЕМП, оскільки додатковий нагрів, наявність деяких пульсацій електромагнітного моменту, вплив зовнішнього магнітного поля тільки сприяє технологічному режиму обробки субстрату. Обмежувальними є лише фактори можливого підвищення вібрацій і електричних перенапружень.

2.4 Моделювання та аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача

До розгляду приймаємо такий варіант розрахункової схеми ПЕМП: зовнішній гладкий порожнистий ротор з внутрішнім розташуванням джерела обертового магнітного поля у вигляді нерухомого статора з розширенням розрахункової області в зону технологічної середовища (субстрата) на величину радіального розміру лопатей (рис.2.2). Математичною моделлю (ММ) нелінійної магнітної системи з розподілом густини струмів є система рівнянь Максвелла для векторів електромагнітного поля, що містять: закон повного струму; закон електромагнітної індукції та рівняння безперервності магнітного поля. Система рівнянь доповнюється матеріальним рівнянням зв'язку між векторами індукції та напруженості магнітного поля та законом Ома у диференціальній формі. Рівняння для моделювання тривимірного (3D) електромагнітного поля відносно векторного магнітного потенціалу \vec{A} при використанні роторної системи координат:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}\right) - j\omega_1 s \gamma \vec{A} = -\vec{J}_{\text{стор}}. \quad (2.15)$$

де ω_1 – кутова швидкість поля статора; s – ковзання ротора; $J_{x,y,z}$ – компоненти вектора густини сторонніх струмів.

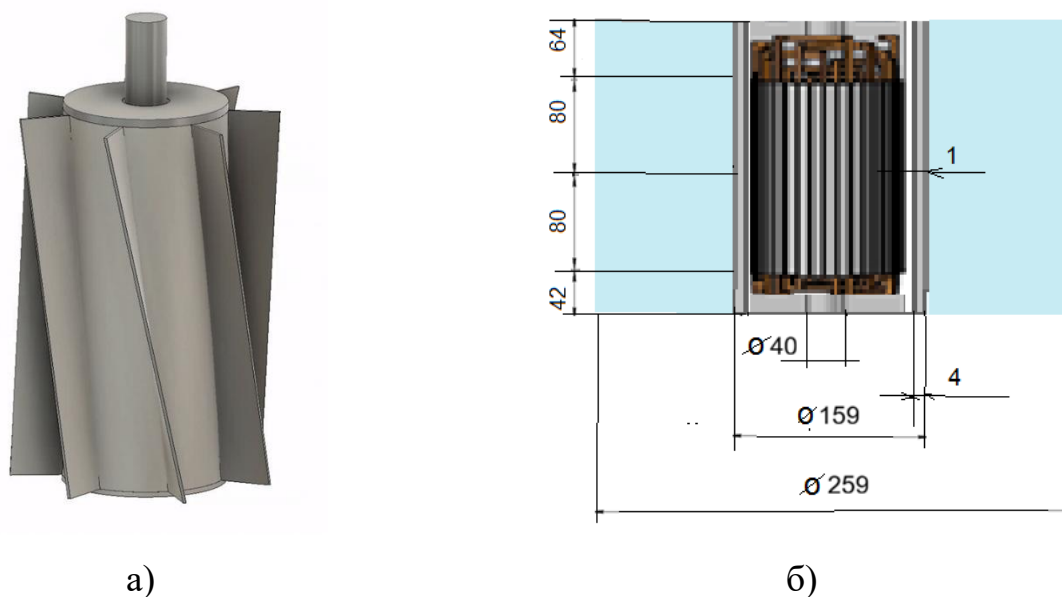


Рис.2.2. Розрахункова схема ПЕМП: а – загальний вид; б – поперечний переріз з розмірами активної зони

Джерело: розроблено автором.

Рівняння (2.15) доповнюється граничними умовами: нульове значення векторного магнітного потенціалу на зовнішніх межах розрахункової області $\vec{A} = 0$; на межі розділу середовищ з різними магнітними властивостями використовується умова рівності нормальних до межі складових вектора магнітної індукції та дотичних складових вектора напруженості магнітного поля: $\vec{B}_{n1} = \vec{B}_{n2}$, $\vec{H}_{\tau 1} = \vec{H}_{\tau 2}$.

Залежності параметрів для феромагнітних та провідних середовищ від просторових координат в ММ представлені матрицями електропровідності та магнітної проникності:

$$[\gamma] = \begin{bmatrix} \gamma_x & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_y & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_z \end{bmatrix}, \quad [\mu_r] = \begin{bmatrix} \mu_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

де $\gamma_{x,y,z}$, $\mu_{rx,ry,rz}$ – електропровідність і відносна магнітна проникність вздовж осей x , y , z відповідно.

Виходячи з умови мінімуму енергетичного функціоналу у вузлах сітки скінченних елементів визначається векторний магнітний потенціал

$$F = \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right] dx dy dz + \int_V j\omega\gamma |\vec{A}^2| dx dy dz + \int_V \vec{J} \vec{A} dx dy dz. \quad (2.17)$$

Складові вектори магнітної індукції \vec{B} , напруженостей магнітного \vec{H} і електричного \vec{E} полів, а також вектора густини вихрових струмів \vec{J}_{eddy} визначаються за результатами визначення розподілу векторного магнітного потенціалу:

$$\begin{aligned} \vec{B}_x &= \text{rot } \vec{A}_x; & \vec{B}_y &= \text{rot } \vec{A}_y; & \vec{B}_z &= \text{rot } \vec{A}_z; \\ \vec{H}_x &= \frac{\vec{B}_x}{\mu_0 \mu_{rx}}; & \vec{H}_y &= \frac{\vec{B}_y}{\mu_0 \mu_{ry}}; & \vec{H}_z &= \text{rot } \frac{\vec{B}_z}{\mu_0 \mu_{rz}}; \\ \vec{E}_x &= j\omega \vec{A}_x; & \vec{E}_y &= j\omega \vec{A}_y; & \vec{E}_z &= j\omega \vec{A}_z; \\ \vec{J}_{eddy x} &= j\omega\gamma_x \vec{A}_x; & \vec{J}_{eddy y} &= j\omega\gamma_y \vec{A}_y; & \vec{J}_{eddy z} &= j\omega\gamma_z \vec{A}_z. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Електромагнітний момент обчислюється шляхом об'ємного інтегрування електромагнітного тензору напруженості Максвелла:

$$F = \int_{\partial\Omega} n T dS \quad (2.19)$$

де F – сила як граничний інтеграл тензору напруженості, H ; T – тензор електромагнітного поля; n – вектор нормалі до площини S .

$$\tau = \int_{\partial\Omega} (r - r_0) \times (nT) dS \quad (2.20)$$

де τ – обертовий момент, $H \cdot m$; r_0 – точка на осі обертання.

$$\tau_{ax} = \frac{r_{ax}}{|r_{ax}|} \cdot \tau \quad (2.21)$$

де τ_{ax} – обертовий момент відповідно до осі, $H \cdot m$; r_{ax} – точка на осі.

Тензор напруженості Максвелла використовується для оцінки сил нормальної та тангенціальної складової тензору напруженості за наступними рівняннями:

$$\sigma_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \quad (2.22)$$

де σ_r – нормальна складова електромагнітного зусилля, H/m^2 ; B_n – нормальна складова щільності магнітного потоку, T ; B_t – тангенціальна складова щільності магнітного потоку, T .

$$\sigma_t = \frac{1}{\mu_0} (B_n \cdot B_t) \quad (2.23)$$

де σ_t , H/m^2 – тангенціальна складова електромагнітного зусилля.

Оскільки розрахункова область розширена в зону технологічної середовища (субстрата), постає питання– яким чином задати властивості цього середовища. Безумовно, можна задати його як суцільне гетерогенне середовище з використанням усереднених характеристик: питомої провідності, магнітної та діелектричної проникності. Але певна частина біополімерів не має строго впорядкованої кристалічної структури, а має дисипативну фрактальну структуру, високомолекулярні сполуки, зокрема лігніни та їх субстрати, мають структуру кількох взаємопов'язаних рівнів. Об'єм води з інокулянтном складає як правило до 91 %. Вода є провідним середовищем для розчинених іонів і молекул. Вода, нейтральна у хімічному відношенні, але не є нейтральною в електричному відношенні, маючи ефективний негативний заряд. Враховуючи ці властивості технологічного середовища, для врахування всіх індукованих струмів було запропоновано в ММ ввести додатково для зони технологічного середовища інші вектори електричної індукції та напруженості магнітного поля, а саме: струм поляризації зв'язаних зарядів; струм вільних носіїв; вихровий струм намагнічування:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + 4\pi \mathbf{P}(\mathbf{r}, t); \quad \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) + 4\pi \mathbf{M}(\mathbf{r}, t), \quad (2.24)$$

де $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) dt$ – вектор густини поляризації, куди входить весь індукований струм; $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ – вектор намагніченості середовища.

Тоді система рівнянь Максвелла для субстрата може бути представлена у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} J_{ext}(\mathbf{r}, t), \\ \operatorname{div} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= 4\pi \rho_{ext}(\mathbf{r}, t), \quad \operatorname{div} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

В системі встановлюються додаткові зв'язки між векторами за допомогою матеріальних рівнянь у вигляді інтегральних операторів.

Враховуючи складність визначення струмів поляризації зв'язаних зарядів, вільних носіїв, вихрових струмів намагнічування складної композиції субстрата, у першому наближенні моделювання проведено для технологічного середовища з використанням усереднених характеристик тільки основних компонентів. Фізичні властивості компонентів субстрату такі: лабораторний інокулят (щільність 1000 кг/м³, діелектрична проникність 61); солом'яні гранули (щільність 1444 кг/м³, діелектрична проникність 3,2); пташиний послід (щільність 1300 кг/м³, діелектрична проникність 92). Для попередньо змішаної суміші визначено розрахункові значення фізичних сумішей з рівномірним розподілом компонентів: щільність - 1028 кг/м³; діелектрична проникність - 60,98; максимальний розмір частинок субстрату не більше 3 мм. Ці умови прийняті лише для початкової стадії метаногенезу, оскільки надалі відбуваються суттєві фізико-хімічні зміни, які можуть призвести до змін щільності та діелектричної проникності. Магнітна проникність субстрату прийнята за значеннями для води як домінуючої компоненти – діамагнетика з відносною магнітною проникністю приблизно 0,999.

На рис.2.3 представлено у вигляді поздовжнього зрізу зображення розподілу магнітної індукції по товщині порожнистого ротора. Масив зовнішнього твердотілого ротора ПЕМП одночасно проводить магнітний потік та вихрові струми. В межах довжини пакета статора окремого модуля спостерігається декілька

шарів з різними рівнями магнітної індукції: шар, дотичний до повітряного проміжку, з максимальним значенням індукції (до 1,2 Т) і далі шари з експоненціальним законом змінення індукції в межах глибини проникнення електромагнітної хвилі. Слід відмітити також послаблення магнітного поля внаслідок наявності крайових ефектів в торцевих зонах окремого модуля.

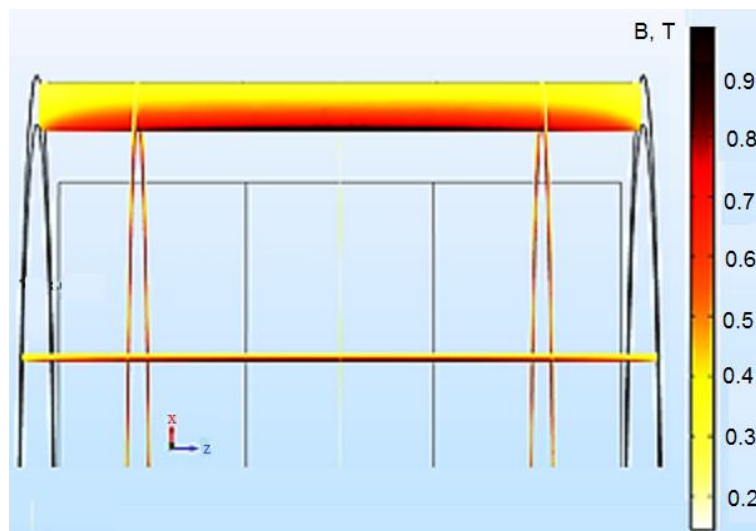


Рис. 2.3. Зображення розподілу магнітної індукції в стінці порожнистого ротора у вигляді поздовжнього зрізу

На рис. 2.4 показано розподіл індукції магнітного поля в площині статора окремого модуля ПЕМП. Рівні магнітної індукції в зоні зубця статора не перевищують 1 Тл, що свідчить про відсутність зон насичення та пояснюється низьким значенням напруги на фазах обмотки. Найвищі значення магнітної індукції (до 1,25 Тл) спостерігаються на боці внутрішньої поверхні ротора на глибині проникнення Δ електромагнітного поля в роторний масив. У масиві та на зовнішній поверхні ротора, яка безпосередньо контактує з субстратом, утворено 6 широких та 6 вузьких зон, що чергуються по колу відповідно до кількості полюсів. На зовнішній поверхні рівні індукції магнітного поля для широкої (протилежної полюсам) та вузької зон становлять 0,05 Тл та 0,015 Тл відповідно, а в зоні субстрату різко зменшується у радіальному напрямку за оберненою залежністю від квадрата відстані до поверхні.

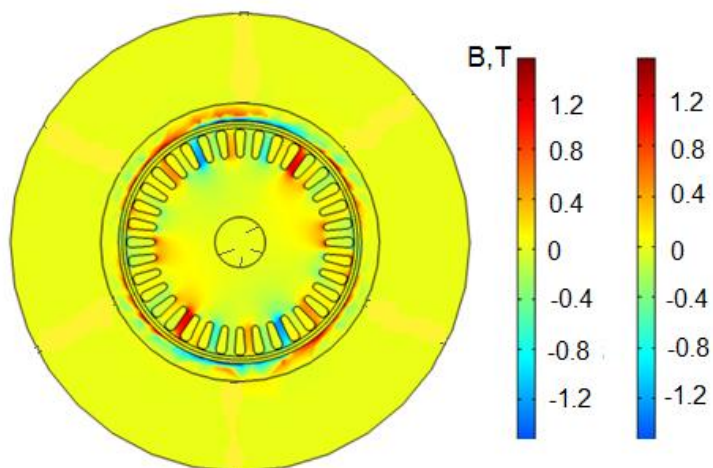


Рис. 2.4. Густина магнітного потоку у поперечному перерізі ПЕМП (ліва легенда – X-компонента, права легенда – Y-компонента)

На рис. 2.5 показано перехідний процес зміни електромагнітного моменту заглибного ПЕМП при живленні синусоїдальною напругою, а на рис. 2.6 – графік залежності електромагнітного моменту заглибного ПЕМП від кутової швидкості феромагнітного ротора.

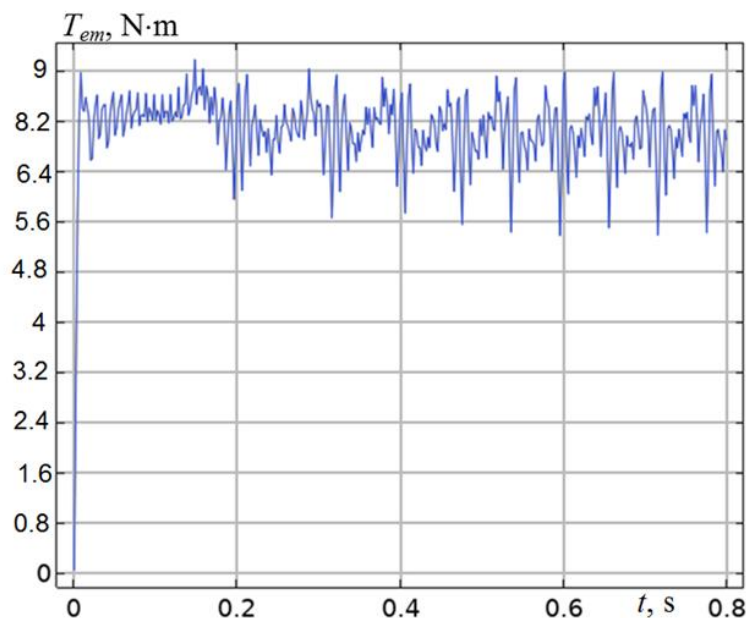


Рис. 2.5. Електромагнітний момент заглибного ПЕМП

Джерело: розроблено автором.

Залежність електромагнітного моменту заглибного ПЕМП від кутової швидкості має характер, подібний до асинхронних машин з масивним феромагнітним ротором.

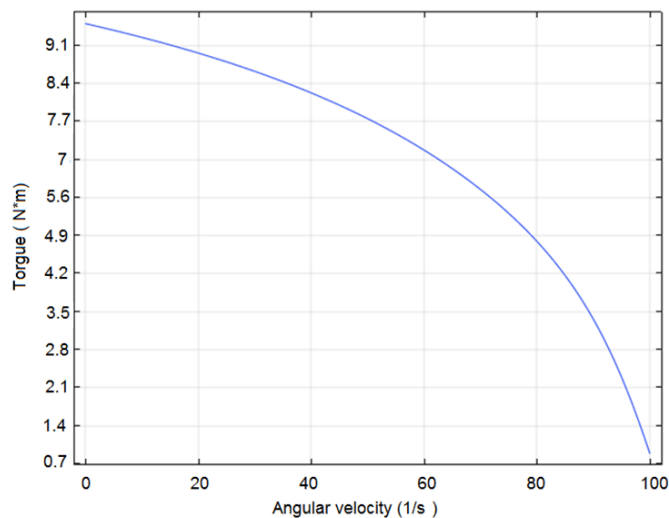


Рис. 2.6. Графік залежності електромагнітного моменту заглибного ПЕМП від кутової швидкості феромагнітного ротора

Джерело: розроблено автором.

В зоні робочого діапазону ковзань ($s = 0,9 - 0,97$) електромагнітний момент становить не менше $9,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

2.5. Моделювання та експериментальні дослідження магнітного поля, що створюється нагрівальним кабелем, який розміщений у лопатях мішалки біогазового реактора

Перспективними методами передачі тепла до матеріалів, що нагріваються, на сьогодні, є методи електричного нагріву: інфрачервоний, резистивний, індукційний тощо. Електричний нагрів має ряд переваг: висока щільність потоку енергії; можливість досягнення необхідних температур в теплоносії (в досить широкому діапазоні) чи в матеріалі, що нагрівається; процес нагріву є екологічно безпечним; можливість управління розподілом температури за рахунок конструктивних рішень, зміни режимів роботи (частоти, напруги живлення); високий коефіцієнт корисної дії. Метою цього завдання є розробка математичної моделі, чисельне і експериментальне визначення величини та розподілу магнітного поля, що створюється нагрівальним

кабелем, який розміщений у лопатях мішалки для малих біогазових реакторів фермерських господарств.

Для розгляду процесів перемішування субстрату у біореакторі використані результати досліджень [110] переміщення елементарних об'ємів речовини під впливом механічного збурення при швидкості обертання робочого органу електротепломеханічної системи 40 об/хв.

Для розрахунку електромагнітного поля лопатей, в яких встановлено нагрівальний кабель, використовуються рівняння електромагнітного поля для квазістаціонарного режиму:

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0, \operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{j}, \operatorname{rot}\mathbf{A} = \mathbf{B}, \mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad}\phi, \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} \quad (2.26)$$

де \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{j} – вектори магнітного векторного потенціалу, магнітної індукції, напруженості магнітного поля, густини струму відповідно; σ – електрична провідність; t – час, ϕ – електричний скалярний потенціал, μ – магнітна проникність.

Для гармонічних струмів рівняння (2.26) змінюються наступним чином:

$$\operatorname{div}\hat{\mathbf{B}} = 0, \operatorname{rot}\hat{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{j}}, \operatorname{rot}\hat{\mathbf{A}} = \hat{\mathbf{B}}, \hat{\mathbf{E}} = -i\omega\hat{\mathbf{A}} - \operatorname{grad}\phi, \hat{\mathbf{B}} = \mu\hat{\mathbf{H}}, \hat{\mathbf{j}} = \sigma\hat{\mathbf{E}} \quad (2.27)$$

де ω – кутова частота, i – уявна одиниця.

Рівняння електромагнітного поля для тривимірної моделі із системи рівнянь (2.27):

$$\operatorname{rot}\left(\frac{\operatorname{rot}\hat{\mathbf{H}}}{\sigma}\right) = -i\omega\hat{\mathbf{B}} + \operatorname{rot}\left(\frac{\hat{\mathbf{j}}_s}{\sigma}\right) \quad (2.28)$$

Тут $\hat{\mathbf{j}}_s$ – комплексна амплітуда густини струму.

На рис. 2.6, а представлено основні елементи біореактора, де 1 – лопаті мішалки встановлені під кутом 45° , 2 – нагрівальний кабель 3 – резервуар 50 л, 4 – кришка. На

рис.2.6, б представлені габаритні розміри мішалки, а на рис. 2.6 , в - габаритні розміри лопаті і розміщеного всередині нагрівального кабелю.

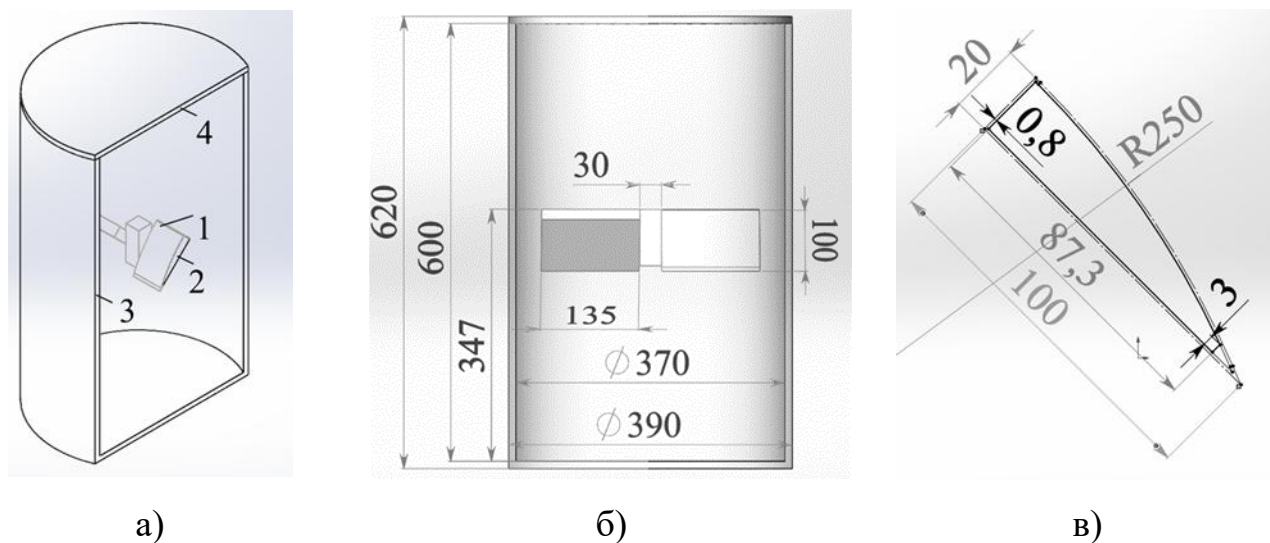


Рис. 3.8. Тривимірної модель одноярусної мішалки

Для дослідження використано два варіанта матеріалу пустотілі лопаті: 1 - зварені з листової високовуглецевої конструкційної сталі Steel 1080 (з покриттям, яке в дослідженні не враховується) товщиною 0,8 мм, з електропровідністю 2 МСм/м, з урахування кривої намагнічування, 2 - нержавіюча сталь з електропровідністю 1,1 МСм/м і відносною магнітною проникністю рівною 1. Резервуар і кришка виконані з звичайної сталі 3 з електропровідністю 2 МСм/м та відносною магнітною проникністю 100. Нагрівальний кабель укладений в вигляді обмотки соленоїда з овальним отвором в центрі діаметром 10 мм і в кожній лопаті має 40 витків (довжину провoda приймаємо 5 м), ширина обмотки вздовж лопаті 130 мм, розміри обмотки у розрізі представлені на рис. 3.8, в. Опір обмотки складає 705 Ом, діаметр жили складає 1 мм виконаної з вуглецевого волокна, діаметр ізолюваного провodu 3 мм.

При моделюванні вихрові струми враховуються в металевих елементах конструкції, крім обмотки. В обмотці присутня лише задана густина струму, що протікає від джерела живлення, а тому тут рівняння (2.28) має вигляд:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{\operatorname{rot} \hat{H}}{\sigma} \right) = \operatorname{rot} \left(\frac{j_s}{\sigma} \right) \quad (2.29)$$

В електропровідних металевих деталях системи рівняння (2.28) має такий вигляд:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{\operatorname{rot} \hat{H}}{\sigma} \right) = -i\omega \hat{B}. \quad (2.30)$$

В повітрі:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{\operatorname{rot} \hat{H}}{\sigma} \right) = 0. \quad (2.31)$$

На внутрішніх границях розділу середовищ прийнята гранична умова рівності нормальних складових індукції і тангенціальних складових напруженості магнітного поля. На зовнішній границі – гранична умова рівності нулю нормальних складових напруженості магнітного поля. Амплітудне значення струму $I_m = 0,44$ А, вибрано з параметрів нагрівального кабелю. Органічна біомаса при моделюванні приймається, як звичайне повітря.

Для перевірки адекватності ММ були виготовлені експериментальні зразки змішувального вузла (рис. 2.9) відповідно з лопатями з феромагнітної сталі та нержавіючої немагнітної сталі з геометричними розмірами і параметрами, які відповідають розрахунковій моделі.

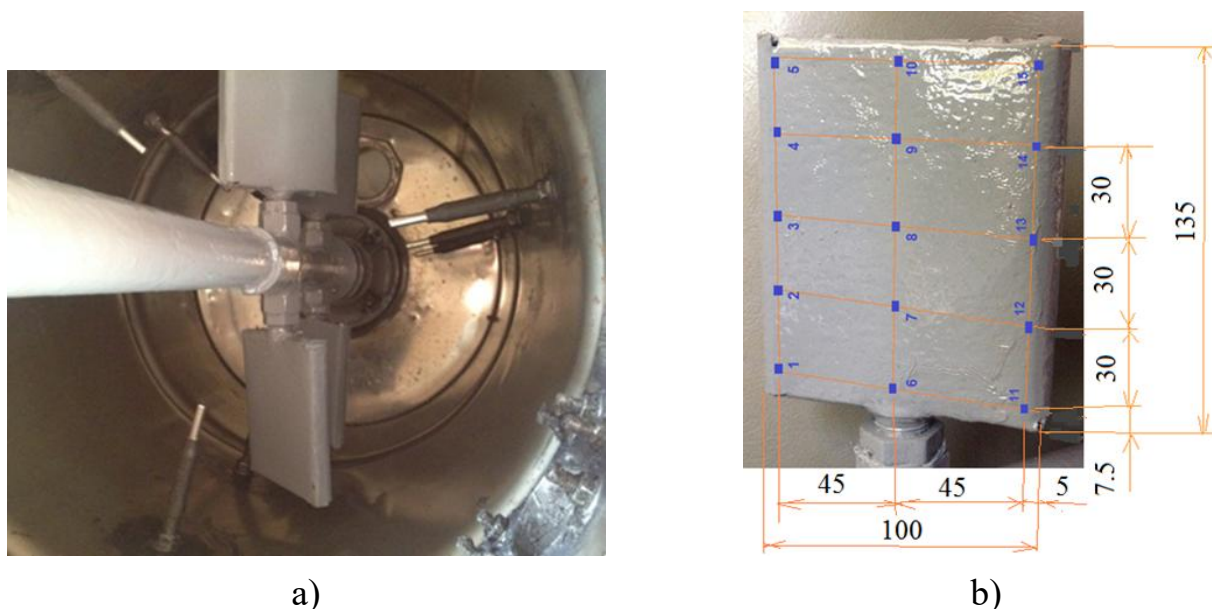


Рис. 2.9. Експериментальний зразок змішувального вузла електротепломеханічної системи: а - розміщення змішувального вузла в біореакторі; б - координати точок вимірювання магнітного поля

Рівні індукцій до 200 μT низькочастотного магнітного поля в діапазоні від 30 до 300 Гц вимірювалися сертифікованим вимірювачем магнітного поля Magnetic Field Meter TM-191 (частотна характеристика: від 30 Гц до 300 Гц). Температура поверхні лопоті за допомогою терморегулятора підтримувалась на рівні $37 \pm 2,5$ °C, величина діючого значення змінного струму через нагрівальний кабель підтримувалась на рівні 0,311 А.

У результаті проведення 3D моделювання одноярусної мішалки з лопатями отримано картини розподілу магнітних полів на поверхні лопатей (рис.2.10). Оскільки при перемішуванні поверхня лопатей контактує з біомасою, через деякий час вся біомаса буде оброблена магнітним полем. З рис.2.10 можна побачити, що індукція по поверхні феромагнітної лопаті на два порядки більша, ніж на лопаті з нержавіючої сталі, а профілі розподілу поля на поверхні лопаті (рис.2.10,а) зумовлені тим, що обмотка не має циліндричної форми і нерівномірна по висоті, що призводить до насичення сталі в передній частині феромагнітної лопаті.

На рис.2.11,а представлено розподіл магнітного поля в перерізі феромагнітної лопаті з максимальним розподілом індукції. Аналізуючи отримані результати, можна відмітити, що використання феромагнітних лопатей дозволяє створити індукцію до 0,08 Тл на поверхні лопаті, але не дають можливості вийти полю за межі лопаті, в той час як неферомагнітний матеріал дозволяє це зробити і обробляти більший об'єм органічної біомаси.

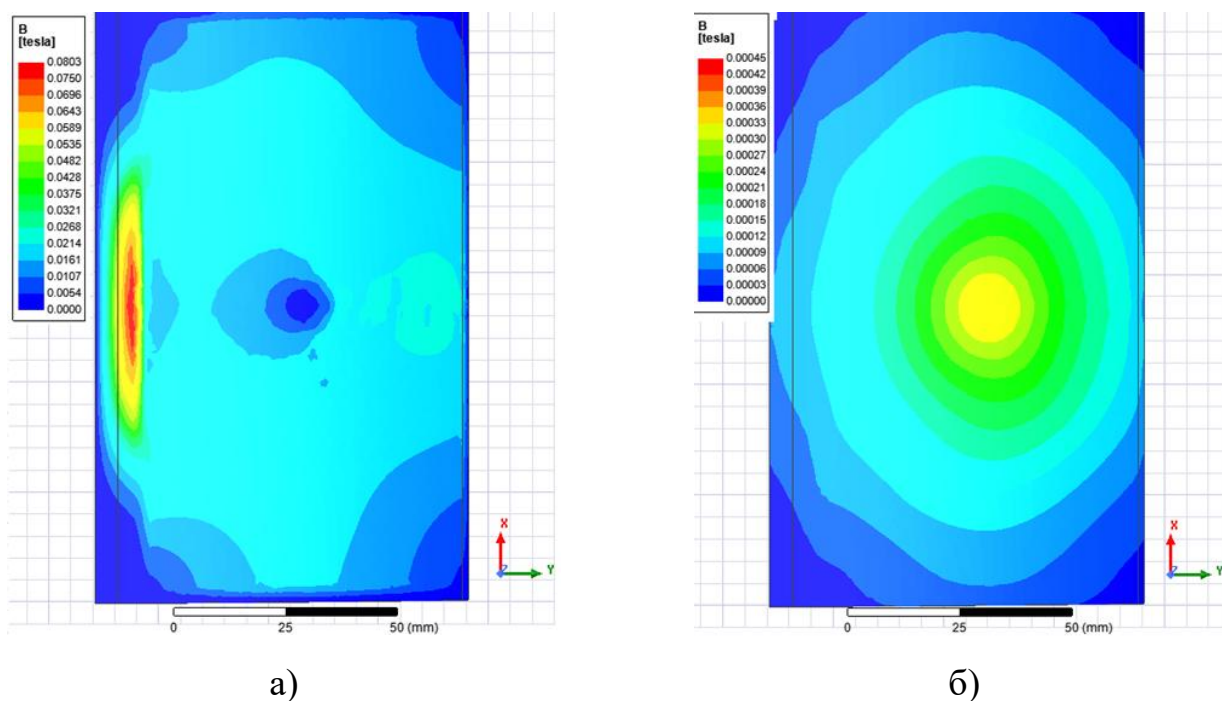


Рис. 2.10. Розподіл магнітного поля на поверхні лопаті: а – феромагнітна лопать, б – лопать з нержавіючої немагнітної сталі

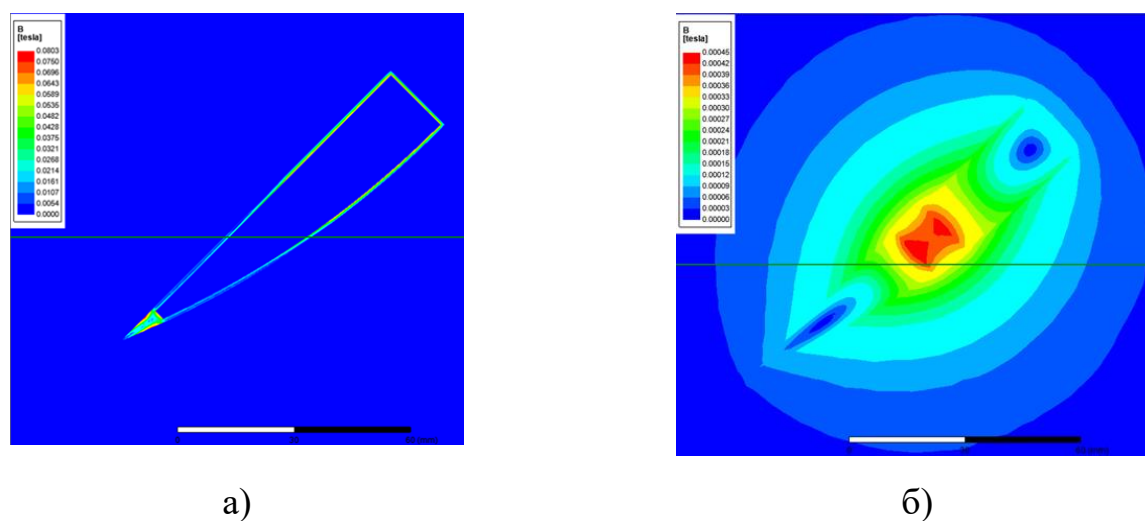


Рис. 2.11. Розподіл магнітного поля в перетині лопаті: а – феромагнітна лопать, б – лопать з нержавіючої немагнітної сталі

На рис. 2.12 представлено результати моделювання розподілу магнітного поля на відстані 1 мм від поверхні лопаті.

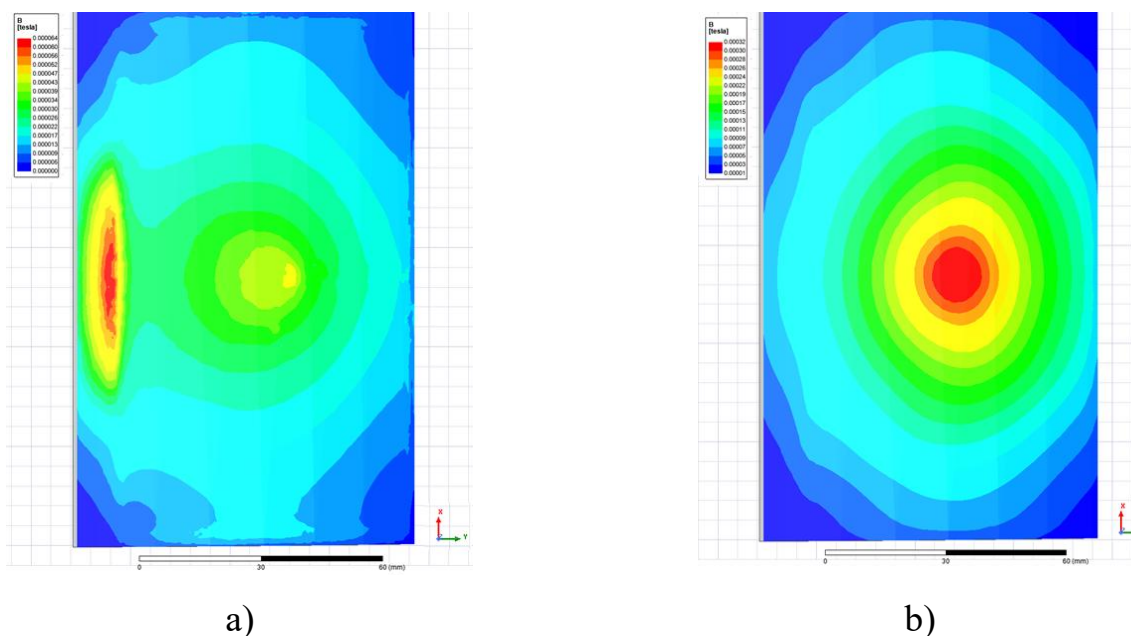


Рис.2.12. Розподіл магнітного поля на відстані 1 мм від поверхні лопаті: а – феромагнітна лопать, б – лопать з нержавіючої немагнітної сталі

На рис.2.13 2.14 представлені результати обробки експериментальних даних з використанням кубічної інтерполяції між точками з вимірними значеннями методом «cubic» та апроксимації на краях поверхні вимірювання методом радіальної базисної функції "Radial Basis Function (RBF)" [118].

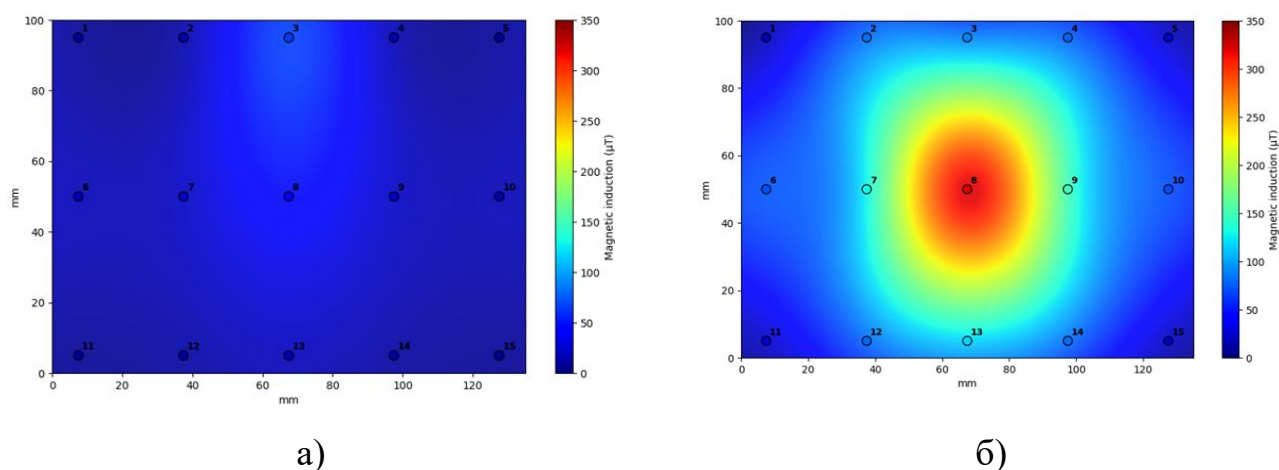


Рис.2.13. Результати експериментальних вимірювань магнітного поля на відстані 1 мм від поверхні лопаті: а- феромагнітна сталева лопать; б – лопать з нержавіючої немагнітної сталі

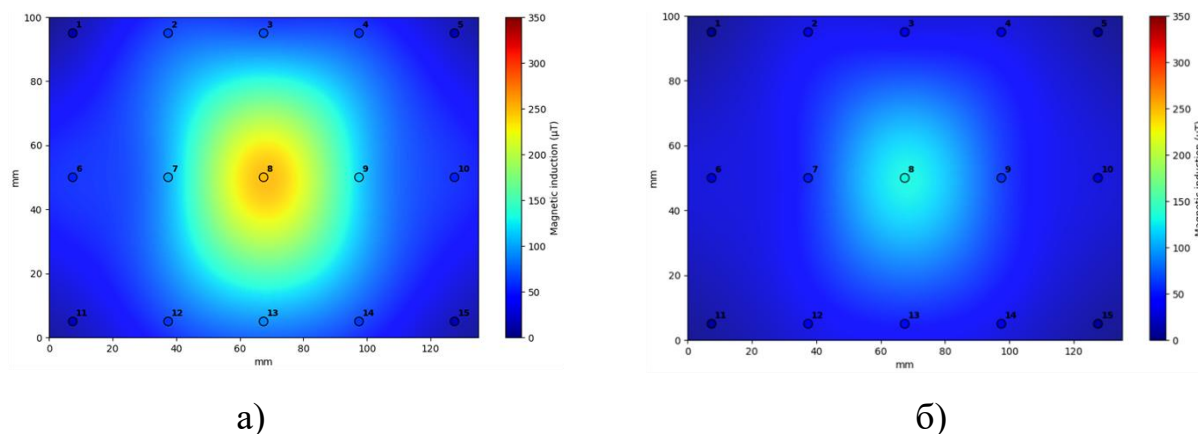


Рис.2.14.Результати вимірювань магнітного поля лопаті з нержавіючої немагнітної сталі: а) - на відстані 2 мм від поверхні; б) - на відстані 10 мм від поверхні

Середні відхилення між результатами моделювання та експериментом складають не більше 6%. Досягнуті рівні магнітної індукції достатні для дієвого впливу на водну компоненту і мікроорганізми субстрату з метою їх стимуляції лише на поверхні лопотів або на відстані 0,5 мм від поверхні. Оскільки існують можливості регулювання напруги в електричній системі живлення і зміни обмоткових параметрів обмоток з нагрівального кабелю, наступним кроком удосконалення змішувального вузла електротепломеханічної системи біореактора повинне бути збільшення значення струму.

Регулювання інтенсивності магнітного поля та його виду (статичне, змінне), тривалість експозиції і, відповідно, тривалість перемішування і нагріву при використанні електротепломеханічної системи регулюється вибором системи живлення, кількістю секцій нагрівального кабелю та швидкістю обертання лопатей.

2.6. Розробка апаратно-програмного комплексу керування та збору даних з обертових частин заглибного ПЕМП

Реалізація теоретичних концепцій електротепломеханічного перетворення енергії та управління біохімічними процесами метаногенезу, викладених у попередніх підрозділах, вимагає створення надійної системи моніторингу та керування. Специфіка об'єкта дослідження – заглибного ПЕМП, що працює безпосередньо в

агресивному та вибухонебезпечному середовищі біогазового реактора – накладає жорсткі обмеження на вибір методів та засобів автоматизації.

Головною науково-технічною задачею на даному етапі є організація безперервного та достовірного збору даних з обертової частини. Традиційні методи передачі вимірювальних сигналів та живлення за допомогою контактних кілець і щіткових апаратів є абсолютно неприпустимими через високий ризик іскроутворення. Тому виникає об'єктивна необхідність у розробці спеціалізованого апаратно-програмного комплексу, який би забезпечував гальванічно розв'язаний (безконтактний) енергообмін та бездротову телеметрію.

Логічна архітектура апаратно-програмного комплексу побудована за ієрархічною (дворівневою) топологією типу «Master-Slave» (Ведучий-Ведений), що забезпечує чітку синхронізацію процесів вимірювання та збору даних [36]. Архітектуру умовно можна поділити на дві частини (рис.2.15):

- Нижній рівень (Ведений-вузол): Розташований на обертовій частині ПЕМП. Його ядром є мікроконтролер з ультранизьким енергоспоживанням (LGT8F328P). Цей вузол функціонує в жорсткому імпульсному режимі, який диктується алгоритмом роботи повітряного трансформатора. Його завдання – за короткий час активного вікна (коли подано живлення) ініціалізувати датчики DS18B20, виконати вимірювання температур, частоти обертання та сформувати пакет даних і відправити його через радіоканал. Цей вузол не приймає рішень, а лише транслює зібраний масив "сирих" даних.

- Верхній рівень (Ведучий-вузол): Базується на головному мікроконтролері ATmega328P, розташованому у вибухобезпечному ізотермічному контейнері на кришці реактора. Цей вузол керує всім комплексом: формує імпульси живлення для первинної обмотки повітряного трансформатора, опитує статорні датчики (АНТ10, АЗ144), збирає дані з модулів PZEM-004, керує частотним перетворювачем по RS-485 (Modbus RTU) та приймає телеметрію від роторного вузла. Зібрана та синхронізована у часі інформація передається на термінал ПК (SCADA-систему) для візуалізації, архівування та формування алгоритмів керування.

Заглибний поліфункціональний електроomeханічний перетворювач (ЗПЕП).

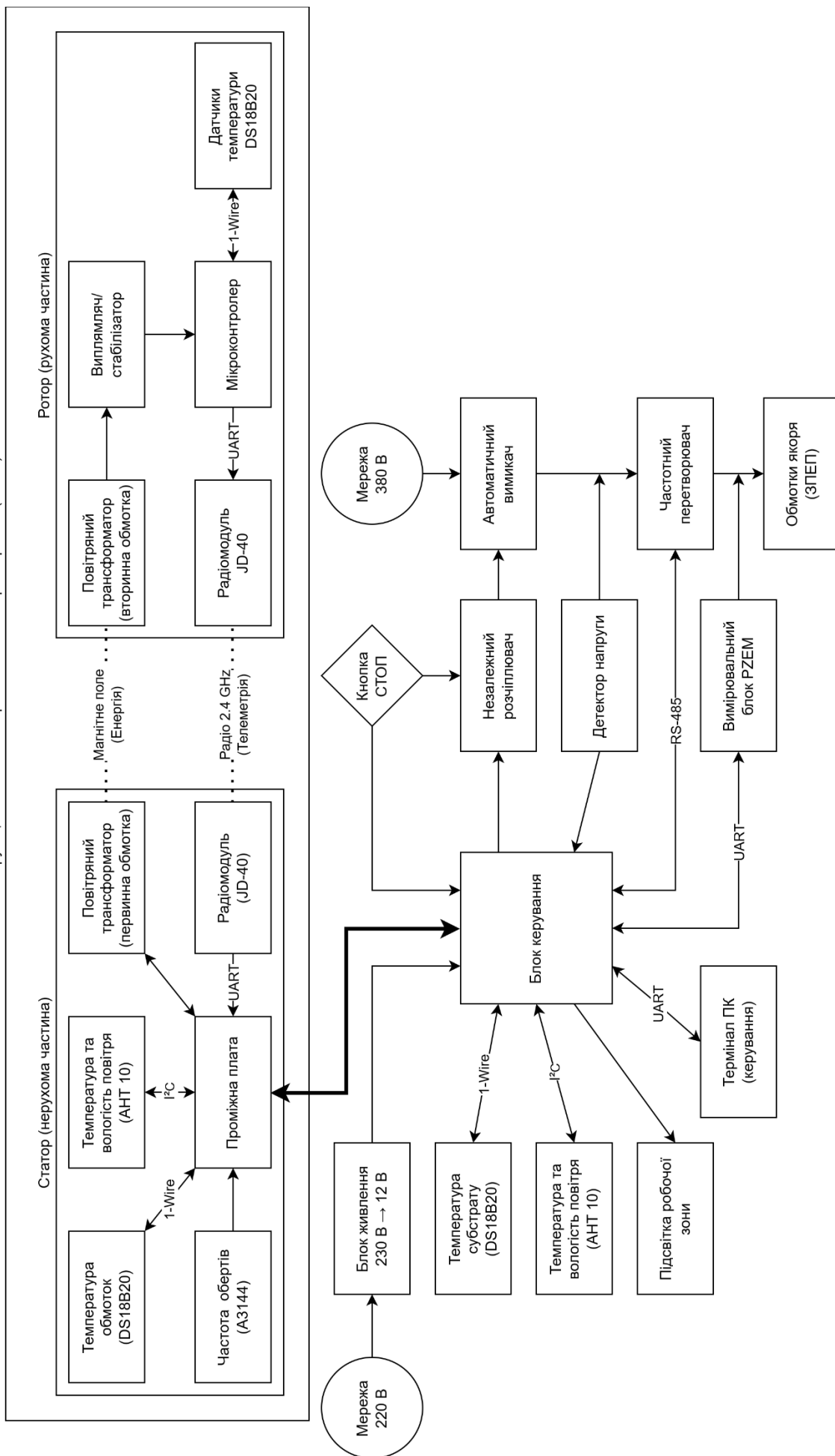


Рис. 2.15. Структурна схема експериментального стенда

Джерело: розроблено автором

Для забезпечення надійної передачі масивів даних між мікроконтролерами *розроблено оптимізований бінарний протокол обміну*. В умовах роботи потужного частотно-регульованого електроприводу генерується високий рівень електромагнітних завад (гармонік та субгармонік), що унеможлиблює використання стандартних текстових форматів через їх надмірну надлишковість та вразливість до спотворень [36]. Бінарний протокол базується на передачі жорстко фіксованих структур даних. Кожен пакет має уніфіковану архітектуру:

- Header (Заголовок, 2 байти): Містить унікальну сигнатуру та ідентифікатор типу даних (наприклад, пакет температур ротора, пакет параметрів мікроклімату, пакет електричних даних). Це дозволяє приймачу миттєво синхронізуватися з потоком байтів.

- Timestamp (Часова мітка, 4 байти): Значення системного таймера в момент вимірювання, що критично важливо для коректного злиття даних від різних підсистем на стороні ПК.

- Payload (Корисне навантаження, N байт): Безпосередньо масив виміряних значень у шістнадцятковому форматі. Наприклад, для ротора це 26 байт (13 датчиків \times 2 байти на кожне значення температури).

- CRC (Контрольна сума, 1 байт): Байт валідації цілісності пакета.

Для захисту даних від спотворень, викликаних комутаційними завадами силового інвертора, *впроваджено алгоритм циклічного надлишкового коду CRC-8* (з використанням полінома $x^8 + x^5 + x^4 + 1$, представлення 0x8C). Програмна функція crc8 обчислює хеш для всього масиву байтів (Header + Timestamp + Payload). На стороні головного контролера отриманий пакет вважається валідним виключно за умови збігу розрахованої та прийнятої контрольної суми. Пакети з помилками беззастережно відкидаються, а система ініціює повторний запит. Це гарантує, що до бази даних потраплять лише достовірні результати вимірювань, що є фундаментальною умовою для коректного математичного моделювання процесів тепломасообміну.

Зворотний канал зв'язку (від ПК до Ведучого-вузла) використовується для оперативного керування режимами роботи: зміни частоти роботи для перетворювача, коригування періодів опитування датчиків "на льоту" (без перепрограмування мікроконтролера) та калібрування вимірювальних каналів напруги та струму.

Розроблений апаратно-програмний комплекс керування та збору даних являє собою багаторівневу розподілену систему, яка структурно та логічно поділяється на дві взаємопов'язані частини:

- Нерухома (статорна) частина та пульт керування: Включає головний мікроконтролер, модулі вимірювання електричних параметрів мережі живлення, систему керування частотним перетворювачем (або іншим пристроєм керування ПЕМП), стаціонарні датчики мікроклімату, первинну обмотку системи безконтактної передачі енергії (СБПЕ) та трансивер для прийому телеметрії.

- Рухома (роторна) частина: Являє собою автономний вимірювальний вузол, інтегрований у внутрішню порожнину ПЕМП. Він включає вторинну обмотку СБПЕ з випрямлячем-стабілізатором, локальний мікроконтролер з ультранизьким енергоспоживанням, масив цифрових датчиків для просторового сканування температурного поля та радіопередавач.

Функціональне призначення комплексу полягає у синхронному зборі різнорідних даних:

- Електричних параметрів споживання ПЕМП (напруга, струм, активна потужність, $\cos \phi$), які є непрямими індикаторами в'язкості субстрату та ефективності електромагнітного перетворення.

- Теплових параметрів (багатоточковий розподіл температури по поверхні ротора та статора), що критично важливо для запобігання термічному шоку метаногенних бактерій та коагуляції білка.

- Кінематичних параметрів (частота обертання ротора), необхідних для оцінки гідродинамічного режиму перемішування.

Для забезпечення роботи комплексу в режимі реального часу програмне забезпечення головного мікроконтролера побудовано за архітектурою поділу часу на

основі суперциклу без використання блокуючих затримок. Це дозволяє квазіпаралельно виконувати задачі опитування датчиків по шинах 1-Wire та I2C, підтримувати зв'язок із частотним перетворювачем (або іншим виконавчим пристроєм) по протоколу Modbus RTU (інтерфейс RS-485), керувати імпульсним живленням повітряного трансформатора та обробляти вхідні пакети бездротової телеметрії з перевіркою їх цілісності за алгоритмом CRC-8.

Вибір та обґрунтування елементної бази апаратно-програмного комплексу керування та збору даних з обертових частин заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача надано в матеріалах Додатку И.

Такий системний підхід до побудови апаратно-програмного забезпечення дозволяє перетворити заглибний ПЕМП із простого виконавчого механізму на інтелектуальний «сенсор», здатний здійснювати глибокий моніторинг стану біореактора без порушення вимог вибухобезпеки.

2.7. Розробка та реалізація системи безконтактного живлення

Забезпечення електричною енергією вимірювального модуля, розташованого на обертовому порожнистому феромагнітному роторі (ПФР), є однією з найскладніших апаратних задач при розробці заглибного ПЕМП. Традиційні контактні методи (щітково-колекторні вузли) в умовах біогазового реактора є джерелом іскроутворення, що створює загрозу вибуху метану. Крім того, агресивне середовище (сірководень, висока вологість) призводить до швидкої деградації ковзних контактів. З огляду на це, єдиним технічно безпечним та надійним рішенням є застосування системи безконтактної передачі енергії (СБПЕ) на базі обертового трансформатора з повітряним зазором. Для промислових масштабів може застосовуватися складна трирівнева система перетворення (з проміжною ланкою постійного струму 380 В DC, як теоретично обґрунтовано у попередніх розділах, для реалізації експериментального стенда було обрано більш раціональну та надійну архітектуру. Генератор повітряного трансформатора інтегрований у загальну шину живлення низьковольтної електроніки стенда.

Запропонована трирівнева модульна структура джерела живлення. На першому рівні модуль змінного струму в постійний перетворює напругу 380 В/50 Гц в постійну напругу 380 В. Другий рівень електроживлення складається з модулів перетворювача постійного струму в постійний, які знижують напругу до 12В постійного струму та перетворюють її на змінну несинусоїдальну напругу, що подається на первинну обмотку обертового трансформатора. Нарешті, з вторинної обмотки, яка розташована на обертовій частині ПЕМП, напруга після перетворення у випрямлячі/стабілізаторі за допомогою мікроконтролера подається на радіомодуль і датчики. Схема живлення безпосередньо обертового трансформатора побудована на спеціалізованій мікросхемі IR2153, яка представляє собою високовольтний драйвер для керування двома MOSFET транзисторами з вбудованим генератором ШІМ, що забезпечує стабільне формування сигналів для напівмостових або резонансних перетворювачів (рис.2.16).

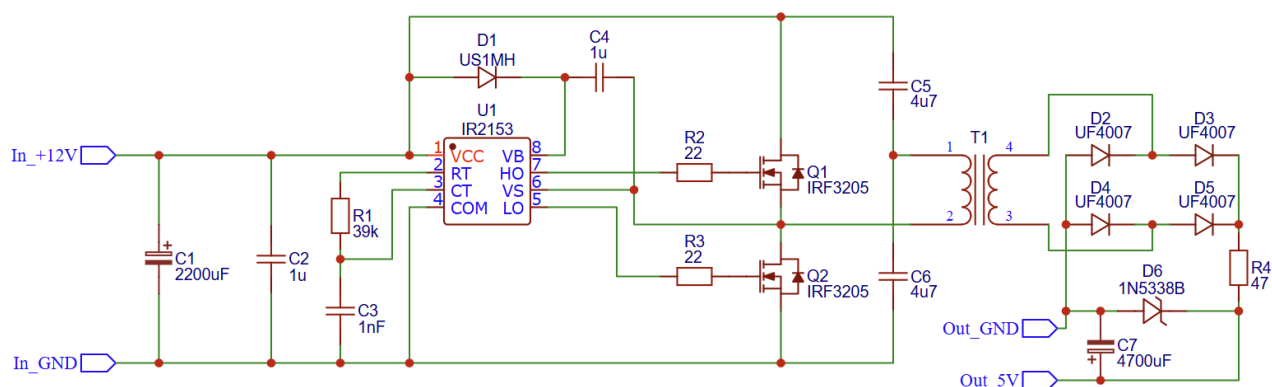


Рис. 2.16. Схема напівмостового перетворювача напруги

Джерело: розроблено автором.

Джерелом енергії слугує стандартний промисловий негерметичний АС/DC блок живлення, який перетворює мережеву напругу 220 В АС у стабілізовану напругу 12 В DC. Блок має номінальну вихідну потужність 60 Вт (максимальний струм 5 А). Такого енергетичного бюджету цілком достатньо для паралельного живлення головної плати керування, системи світлодіодної підсвітки робочої зони ПЕМП та, власне, первинної сторони обертового трансформатора, пікове споживання якого не перевищує кількох

ват. Основою передавальної частини СБПЕ є напівмостовий інвертор, побудований на базі спеціалізованого високовольтного драйвера IR2153. Ця мікросхема містить вбудований генератор з можливістю налаштування частоти (за допомогою зовнішньої RC-ланцюжка) та логіку керування верхнім і нижнім ключами з фіксованим «мертвим часом», що запобігає наскрізним струмам.

Як силові комутуючі елементи використано N-канальні MOSFET-транзистори IRF3205, які характеризуються низьким опором відкритого каналу. Схема перетворює постійну напругу 12 В у змінну імпульсну напругу прямокутної форми (ШІМ-сигнал). Особливістю напівмостової топології є те, що діюче значення напруги, яка прикладається до первинної обмотки трансформатора, становить приблизно половину від напруги живлення – тобто близько 6–6,5 В. Робоча частота інвертора була налаштована на рівні 2 кГц. Як довели попередні експериментальні дослідження та математичне моделювання, саме на цій частоті досягається оптимальний баланс: індукована напруга на вторинній обмотці становить близько 80% від максимуму, при цьому втрати на вихрові струми у металевих елементах конструкції та реактивний опір витків залишаються на прийнятному рівні, що забезпечує максимальний практичний ККД повітряного трансформатора (близько 17%).

Приймальна частина СБПЕ розміщена на обертовому роторі. Змінна напруга, індукована у вторинній обмотці, повинна бути випрямлена та згладжена для живлення локального мікроконтролера LGT8F328P, масиву з 13-ти датчиків DS18B20 та радіомодуля JDU-40. Загальна необхідна потужність становить 100–300 мВт. Враховуючи низький коефіцієнт магнітного зв'язку повітряного трансформатора та специфіку напівмостового генератора, амплітуда напруги на вторинній обмотці під навантаженням становить близько 4,5–5,0 В змінного струму. За таких умов використання класичного діодного моста на стандартних кремнієвих випрямних діодах є технічно недоцільним. Пряме падіння напруги на двох відкритих кремнієвих діодах у мостовій схемі становить близько 1,4–2,0 В. Втрата такої частки напруги призвела б до того, що напруга на згладжувальному конденсаторі впала б нижче мінімально допустимого рівня для роботи стабілізатора та мікроконтролера.

Для розв'язання цієї проблеми повномостовий випрямляч вторинної сторони був реалізований виключно на діодах Шоттки. Вони відрізняються надзвичайно низьким прямим падінням напруги (близько 0,2–0,3 В на діод). Це дозволило зберегти дорогоцінні 1–1,5 В різниці потенціалів та забезпечити достатній рівень напруги для живлення мікроелектроніки. Крім того, з метою максимальної енергоефективності в умовах жорсткого дефіциту потужності (100–300 мВт), було прийнято інженерне рішення повністю відмовитися від використання традиційних лінійних стабілізаторів напруги (типу LDO), які неминуче розсіюють частину дефіцитної енергії у вигляді тепла. Замість цього обмеження та стабілізація напруги (на рівні 5 В) реалізовані за допомогою параметричного стабілізатора на базі потужного 1N5338В з напругою стабілізації 5,1 В та струмообмежувального резистора 47 Ом. Таке схемотехнічне рішення у зв'язці з фільтруючим буферним конденсатором великої ємності дозволяє надійно захистити локальний мікроконтролер LGT8F328P від перенапруги в моменти мінімального навантаження і при цьому уникнути зайвих втрат корисної потужності під час імпульсної роботи радіомодуля.

Для реалізації живлення обертового трансформатора був вибраний адаптивний алгоритм керування. Це обумовлено тим, що трансформатор з повітряним осердям характеризується значними струмами намагнічування. Його безперервна робота призводить до неминучого розігріву первинної та вторинної обмоток. У контексті ПЕМП, де однією з головних цілей є високоточне вимірювання температурного поля субстрату, внесення додаткового (паразитного) тепла від системи живлення датчиків є абсолютно неприпустимим, оскільки це спотворить результати наукового експерименту. Для усунення цього впливу розроблено та імплементовано інтелектуальний імпульсний алгоритм керування живленням. Трансформатор не працює постійно; його вмикання здійснюється апаратно через додатковий силовий MOSFET-ключ, встановлений у розриві ланцюга 12 В перед драйвером IR2153, яким безпосередньо керує головний мікроконтролер ATmega328PB.

Логіка роботи цього алгоритму (машина станів) виглядає наступним чином:

- Активація: Після завершення інтервалу очікування Ведучий-мікроконтролер подає керуючий сигнал на MOSFET-ключ. Напруга 12 В надходить на IR2153,

генератор запускається, і обертовий трансформатор починає передавати енергію на ротор.

- Очікування телеметрії: Вторинна сторона отримує живлення, локальний мікроконтролер LGT8F328P ініціалізується, запускає опитування температур на 13-ти датчиках DS18B20, формує пакет даних та відправляє його через радіомодуль JDY-40. Ведучий-вузол у цей час знаходиться в режимі очікування вхідного пакету по UART.

- Валідація та вимкнення (Успішний цикл): Як тільки мікроконтролер отримує пакет даних від телеметрії, він миттєво перевіряє контрольну суму. Якщо дані валідні (CRC збігається), Master негайно знімає сигнал з MOSFET-ключа, повністю знеструмлюючи обертовий трансформатор. Система переходить у режим паузи для природного охолодження обмоток.

- Обробка помилок (Повторний запит): Якщо в умовах сильних електромагнітних завад прийнятий пакет виявляється "битим" (CRC не збігається), мікроконтролер не вимикає живлення трансформатора. Він продовжує утримувати лінію активною, забезпечуючи роторний вузол енергією, і очікує надходження наступного пакету даних. Цей процес повторюється доти, доки не буде отримано математично коректний пакет з вірною CRC.

- Аварійний тайм-аут: Щоб запобігти неконтрольованому перегріву СБПЕ у випадку повної втрати радіозв'язку або апаратної відмови роторного вузла, в алгоритм інтегровано «сторожовий таймер». Якщо валідні дані не надходять протягом граничного інтервалу часу (тайм-ауту), мікроконтролер примусово вимикає живлення трансформатора. Після цього витримується гарантована затримка на охолодження, перш ніж система спробує ініціювати новий цикл опитування.

Такий адаптивний підхід до керування системою безконтактного живлення гарантує, що трансформатор знаходиться під струмом рівно стільки мілісекунд, скільки фізично необхідно для отримання одного достовірного результату вимірювання. Це звело до мінімуму паразитне тепловиділення, забезпечивши високу метрологічну чистоту експерименту та подовживши ресурс електронних компонентів.

2.8. Моделювання та експериментальні дослідження обертового трансформатора

Рентабельність використання біогазових установок безпосередньо залежить від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування, різних способів попередньої обробки сировини, впливу фізичних полів на субстрати [56-60].

Безконтактний спосіб передавання електричної енергії до обертових елементів електромеханічних систем є не лише технічно доцільним, а в ряді випадків - єдино можливим рішенням, зокрема у вибухонебезпечних або хімічно агресивних середовищах, де використання традиційних щітково-колекторних вузлів або ковзних контактів суворо заборонене через ризик іскріння, яке може призвести до займання газового середовища. Одним із таких прикладів є внутрішня частина біогазового реактора, де середовище насичене метаном, воднем та іншими горючими сполуками. У таких умовах передавання енергії на роторну частину є суттєвим викликом, який потребує спеціального підходу. Відомі технічні і методологічні рішення, які застосовані в різних галузях промисловості. У статтях [61-66] розглядаються варіанти використання обертового трансформатора та методи їх проектування для передачі потужності за допомогою спеціалізованих сердечників. Оскільки існує фізичне розділення обмоток, обертовий трансформатор має низький коефіцієнт зв'язку. Це призводить до того, що частина загальної енергії, що підводиться, зберігається в самій конструкції трансформатора (в основному в повітряному проміжку), а не передається на вторинну обмотку. Індуктивність намагнічування такого трансформатора набагато нижча, ніж у звичайного трансформатора. Підвищена індуктивність витоків, яка з'являється послідовно з обмотками, викликає падіння напруги на них, що призводить до виникнення другого недоліку обертового трансформатора – погіршення коефіцієнта підсилення напруги.

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 з можливістю електричного живлення обертової частини

перемішувальних і нагрівальних частин для забезпечення роботи датчиків і радіозв'язку в системах моніторингу, аналізу і регулювання режиму роботи біогазового реактора.

У розробленій системі безконтактного передавання енергії трансформаторна структура для проведення експериментальних досліджень реалізована як повітряний обертовий трансформатор із аксіальним розміщенням обмоток (рис.2.17). Первинна обмотка жорстко фіксована на нерухомому сталевому осерді, при цьому між обмоткою та металевим осердям залишено певний повітряний зазор для зменшення паразитної індуктивності та зменшення втрат на вихрові струми у феромагнітному матеріалі. Вторинна обмотка, навпаки, закріплена на роторі ПЕМП – таким чином вона обертається разом із рухомою частиною.

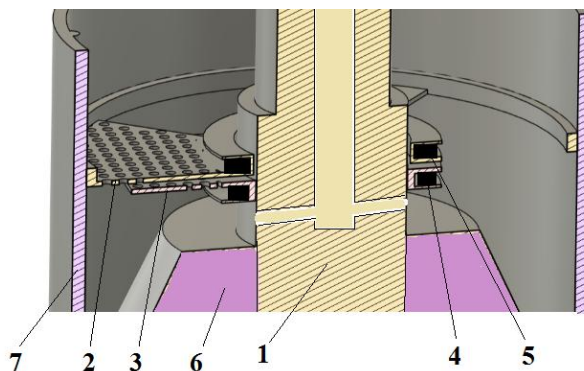


Рис.2.17. Розміщення обертового трансформатора всередині заглибного ПЕМП: 1 – сталеве осердя з каналами для кабелів; 2 – тримач вторинної обмотки; 3 – тримач первинної обмотки; 4 – первинна обмотка; 5 – вторинна обмотка; 6 – лобова частина обмотки статора; 7 – ротор

Джерело: розроблено автором.

Обмотки орієнтовані співвісно одна над одною з аксіальним зазором близько 1 мм, що забезпечує необхідну електричну ізоляцію, відсутність механічного контакту та уникнення зношування внаслідок тертя. Конструктивно вторинна обмотка підтримується у вертикальному положенні над первинною з використанням діелектричних утримуючих елементів, стійких до хімічно агресивного середовища.

На рис.2.18 та рис.2.19 для однієї з експериментальних модифікацій заглибного ПЕМП показано розміщення конструктивних елементів обертового трансформатора,

мікроконтролера ATmega328PB, плати радіоканалу передачі зібраних даних на зовнішній пульт керування.

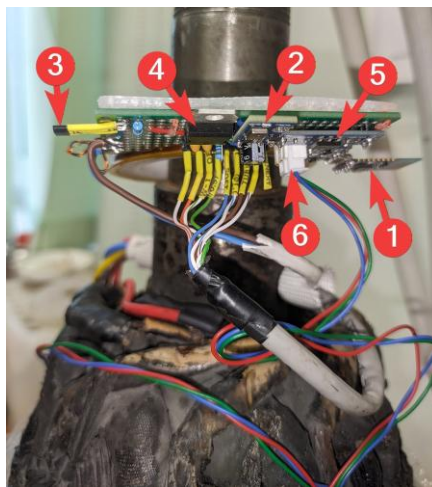


Рис.2.18. Розміщення вузлів електричної схеми на тримачі первинної обмотки обертового трансформатора: 1 - радіомодуль JDY-40; 2 - датчик температури й вологості АНТ10; 3 - датчик Холла А3144 цифровий; 4- стабілізатор напруги LM7805; 5 - стабілізатор напруги AMS1117; 6 –роз’єм для підключення датчиків температури DS18B20

Джерело: розроблено автором.

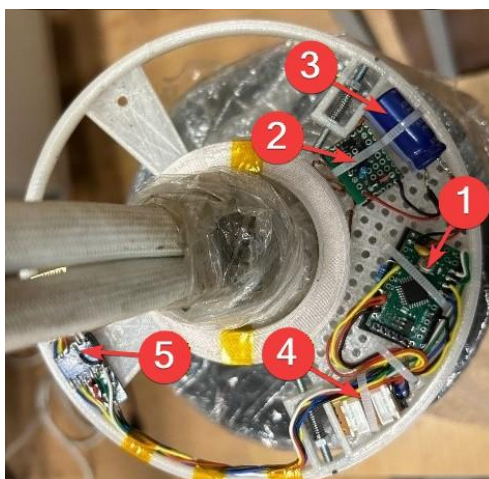


Рис. 2.19. Розміщення вузлів електричної схеми на рухомому тримачі вторинної обмотки обертового трансформатора: 1 - мікроконтролер LGT8F328P; 2 - плата перетворення змінної напруги в постійну; 3 - буферна ємність; 4 - роз’єми для підключення датчиків температури DS18B20; 5 - плата конвертера та радіомодуля JDY-40

Джерело: розроблено автором.

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.2.20 (а) – показана схема заміщення, а на рис.2.20(б) – розрахункова схема обертового трансформатора, які використані при моделюванні. Первинна обмотка з'єднана з первинним резистором R_p та джерелом змінної напруги V_{ac} , тоді як вторинна обмотка підключена до навантажувального резистора R_s .

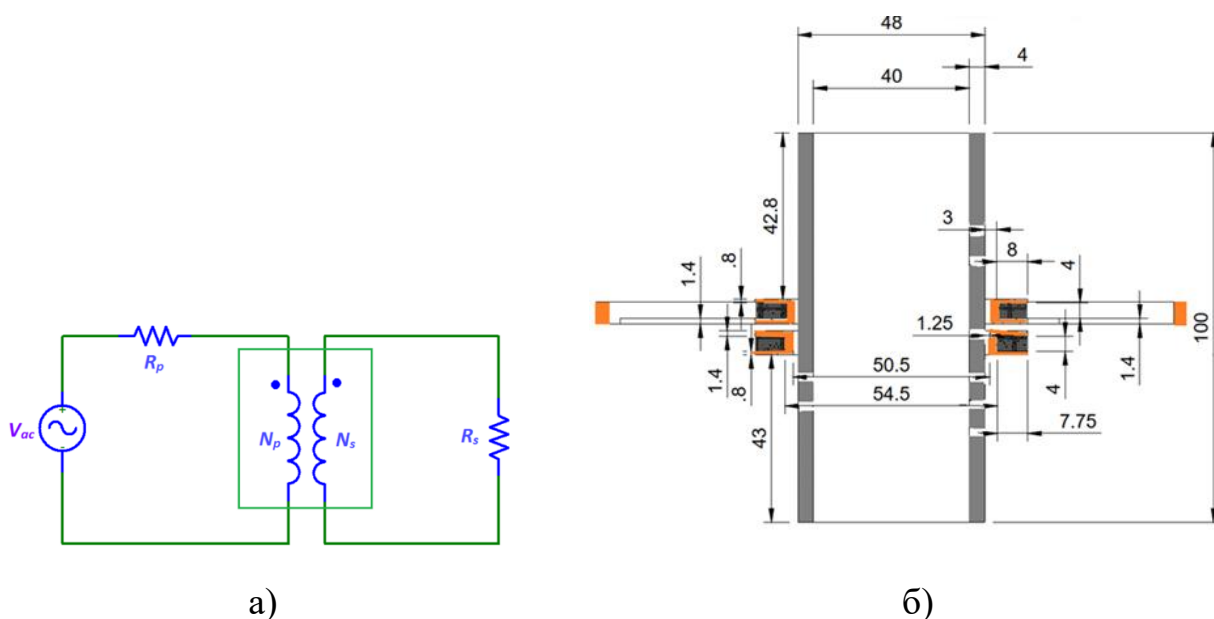


Рис. 2.20. Обертовий трансформатор: а – схема заміщення; б – розрахункова схема для моделювання

Джерело: розроблено автором.

Форма сигналу на виході перетворювача, побудованого на мікросхемі IR2153 – це змінний ШИМ сигнал, RMS якого становить половину від вхідної напруги. Тобто, якщо напруга на вході перетворювача становить 12 В, то на первинну обмотку потрапляє змінна напруга приблизно 6 В. В табл.2.1 вказані параметри експериментального зразка обертового трансформатора.

Таблиця 2.1

Параметри моделі

Параметр	Величина
Частота вхідної напруги, Гц	2000
Кількість витків первинної обмотки	83
Кількість витків вторинної обмотки	91
Індуктивність первинної обмотки, мН	0,73
Індуктивність первинної обмотки з внутрішньою трубою-осердям, мН	0,75
Індуктивність вторинної обмотки, мН	0,82
Індуктивність вторинної обмотки з внутрішньою трубою-осердям, мН	0,85
Активний опір первинної обмотки, Ом	2,3
Активний опір вторинної обмотки, Ом	2,52
Опір навантажувального резистора R_s ,	66,8

Робочий цикл – 0,5. Час розрахунку моделі (за можливостей комп'ютера) – діапазон (0,2e-6,7.5e-4)c.

Кінцево-елементна модель в часовій області дослідження. В зв'язку з необхідною точністю, особливістю конструкції моделювання виконано в програмному середовищі Comsol Multiphysics. Аналіз електромагнітного поля проводиться на основі системи рівнянь Максвелла:

$$\nabla \times H = J \quad (2.32)$$

$$B = \nabla \times A \quad (2.33)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} \quad (2.34)$$

$$J = \sigma E \quad (2.35)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.36)$$

де H – вектор напруженості магнітного поля, А/м; J – вектор густини струму, А/м²; B – вектор щільності магнітного поля, Т; A – векторний магнітний потенціал, Вб/м; E – вектор напруженості електричного поля, В/м; σ – електропровідність, См.

На зовнішній межі з магнітним скалярним потенціалом, нормальна складова щільності магнітного потоку прирівнюється до нуля:

$$n \cdot B = 0 \quad (2.37)$$

Намагніченість осердя задана як В-Н крива і визначається з рівняння:

$$B = f(|H|) \frac{H}{|H|} \quad (2.38)$$

В якості джерела струму в моделі використовуються багатовиткові обмотки трансформатора (рис.2.17), які забезпечують з густину струму:

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{S} e_{coil} \quad (2.39)$$

де N – кількість витків в обмотці; S – загальний переріз, площа домену обмотки, м²; I_{coil} – струм, А; e_{coil} – векторна змінна для візуалізації напрямку витків в обмотці.

За результатами моделювання встановлено закономірності розподілу магнітної індукції в зоні розташування обертового трансформатора (рис.2.21). Максимальні значення магнітної індукції 6,8 мТ спостерігаються в нижній площині діелектричного каркаса тримача первинної обмотки і зміщені в бік порожнистого сталюого осердя з каналами для кабелів (рис.2.21 б). Приблизно такий рівень магнітної індукції (6,5 мТ) встановлено на глибині проникнення електромагнітної хвилі збоку зовнішньої поверхні сталюого осердя, яка може бути розрахована за формулою: $d = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$, де f –частота електромагнітної хвилі, μ , σ – відповідно магнітна проникність і електрична провідність сталі. На частоті 2 кГц для осердя з конструкційної вуглецевої якісної сталі марки 45 з магнітною проникністю 500 Гн/м та електричною провідністю $1,5 \cdot 10^6$ См/м величина глибини проникнення становить 0.4 мм. В той же час, рівні магнітної індукції в зоні розташування вторинної обмотки та в осьовому проміжку між обмотками значно менші і становлять менше 1 мТ (рис.2.21 а).

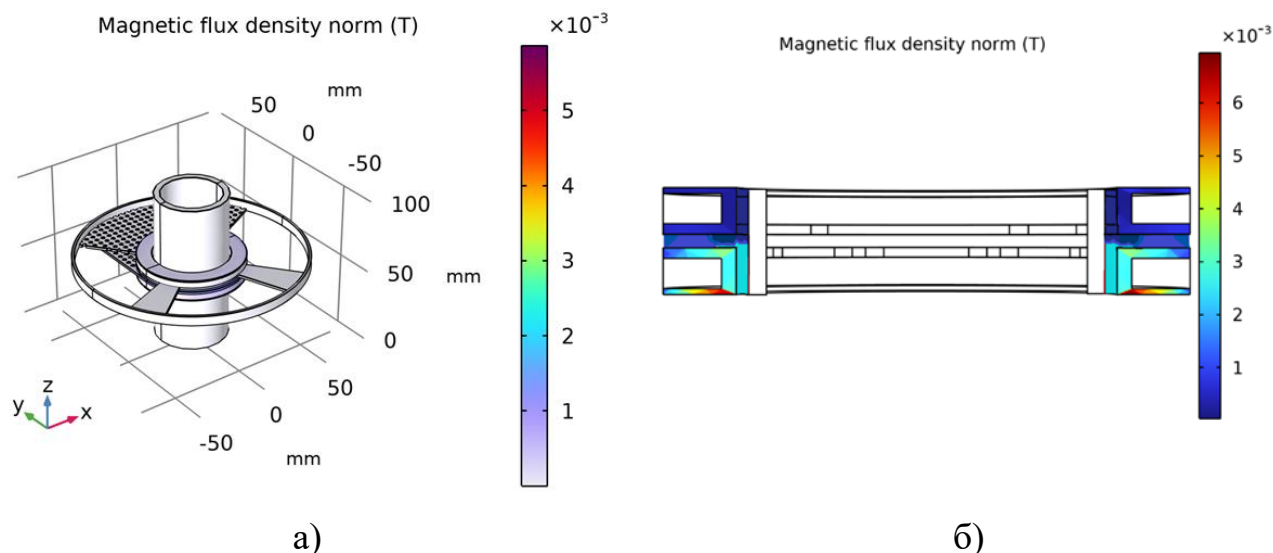


Рис. 2.21. Розподіл магнітної індукції в зоні розташування обертового трансформатора: а – 3-D розподіл; б – розподіл магнітної індукції у поперечному перерізі

Джерело: розроблено автором.

На рис. 2.22 представлені зміни струмів і електрорушійних сил в обмотках обертового трансформатора при навантаженні за результатами моделювання в межах півперіоду.

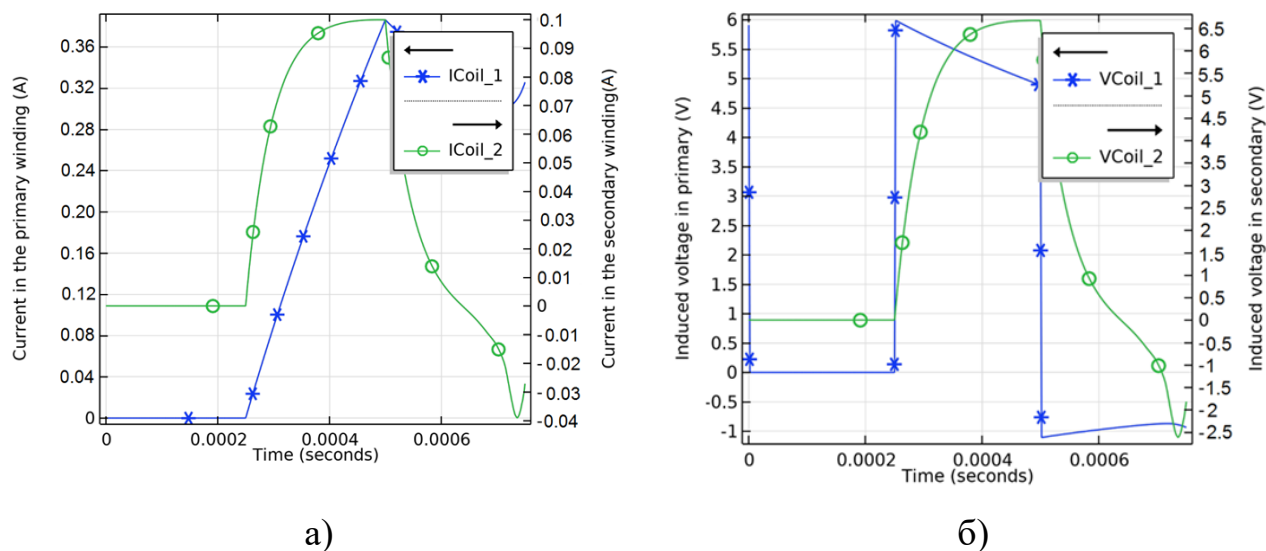


Рис. 2.22. Електричні величини в обмотках обертового трансформатора при навантаженні за результатами моделювання: а – струми; б – електрорушійні сили

Джерело: розроблено автором.

В табл.2.2 представлені експериментальні дані випробувань обертового трансформатора в режимі навантаження.

Таблиця 2.2

Експериментальні дані випробувань трансформатора в режимі навантаження

Осьова відстань між обмотками, mm	f, kHz	U_{lm1} , V	U_{lm2} , V	I_{lm1} , A	I_{lm2} , A
4	4,07	12,382	2,96	0,071	0,044
	3,05	12,359	3,54	0,11	0,053
	2,04	12,28	4,53	0,241	0,068
	1,52	12,212	4,74	0,349	0,071
5,3	4,05	12,386	2,71	0,069	0,04
	3,04	12,36	3,28	0,107	0,049
	2,02	12,272	4,35	0,245	0,067
	1,52	12,2	4,57	0,352	0,068
7,3	4,03	12,39	2,14	0,064	0,032
	3,01	12,365	2,73	0,103	0,04
	2,01	12,28	3,92	0,242	0,058
	1,52	12,206	4,2	0,357	0,062

Примітки: 1. Відстань між суміжними співвісними обмотками дорівнює відстані між торцями обмоток з урахуванням товщини діелектричного каркаса кожної обмотки, а також оптимального повітряного проміжку, що забезпечує обертання вторинної обмотки разом з ротором ПЕМП. 2. Форма сигналу на виході перетворювача, побудованого на мікросхемі IR2153 – це змінний ШИМ сигнал напругою U_{lm1} , лише половина якого подається на перинну обмотку обертового трансформатора від вхідної напруги.

У порівнянні з відомими системами [66, 67] 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 АТmega328РВ 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). В табл.2.3 представлені осцилограми передачі сигналів через обмотки обертового трансформатора (канал жовтого кольору відповідає сигналу первинної обмотки, синій – вторинної). Зображення показані відповідно для режимів неробочого ходу (режим очікування, коли вторинна обмотка розімкнена) та короткого замикання (вторинна обмотка замкнена).

Таблиця 2.3

Осцилограми передачі сигналів через обмотки обертового трансформатора

f, kHz	Режим очікування	Режим короткого замикання
2		
1,5		

Джерело: розроблено автором.

Первинний інвертор прототипу системи живиться напругою 12,28 В, а вихідна напруга становить 4,53 В при частоті 2,04 кГц і вихідній потужності $P_{nom} = 377$ мВт. Отже, при оптимальному режимі роботи схеми обертового трансформатора з напівмостовим живленням, послідовною компенсацією з обох сторін та повним мостовим випрямлячем/ стабілізатором розрахований коефіцієнт передачі напруги становить:

$$K = \frac{V_{вих}}{V_{вх}/2} = \frac{4,53}{6,14} = 0,74 \quad (2.40)$$

Досягнуте значення коефіцієнта передачі напруги хоча і достатнє для функціонування в цілому системи моніторингу стану ПЕМП, але все ж нижче досягнутих в роботах [68, 69] з використанням резонансних режимів. В нашому випадку існує можливість удосконалення схеми, оскільки топологія і основні компоненти схеми вже присутні, а вибираючи значення резонансного конденсатора та частоти перемикання можна визначити робочу точку графічно на основі розрахованих нормалізованих діаграм. В той час, багаторезонансна поведінка резонансного перетворювача створює значну перешкоду під час процесу проектування, а запровадження аналізу методом наближення першої гармоніки має суттєвий недолік: розрахункові результати суттєво відрізняються від моделювання схеми та вимірювань. Крім того, формування нормалізованих діаграм потребує значних ресурсів моделювання і випробувань.

Вибір частоти живлення на рівні 2 кГц підтверджено досягнутими значеннями потужності і ККД обертового трансформатора (рис. 2.23).

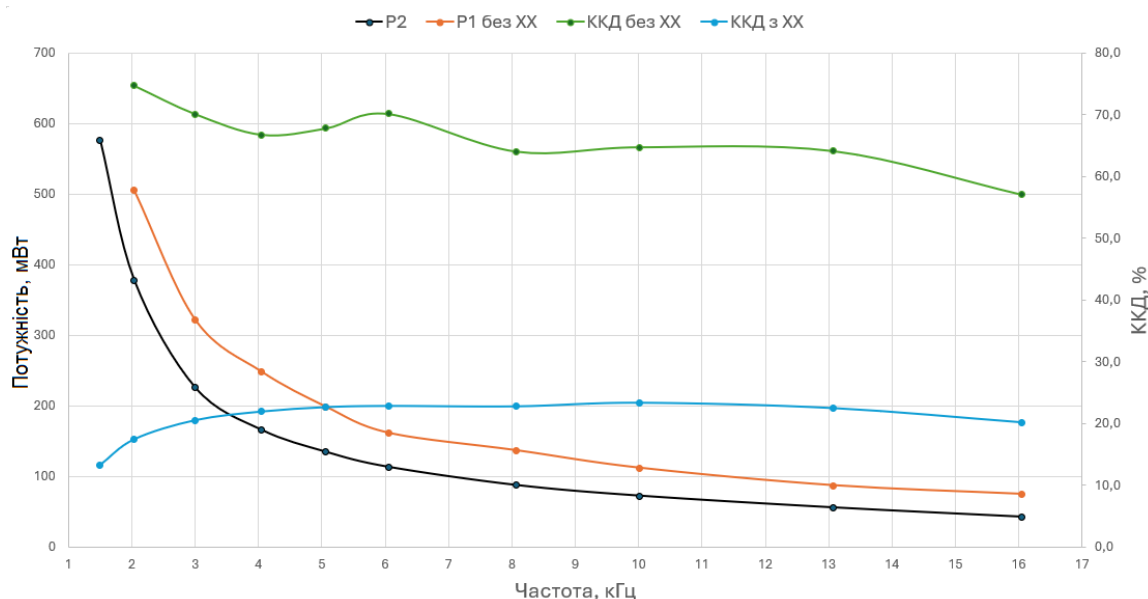


Рис.2.23. Потужність і ККД обертового трансформатора при змінах частоти напруги живлення

Джерело: розроблено автором.

Порівняння електричних величин і параметрів обертового трансформатора досягнутих при моделюванні (рис.2.22) та експериментальних випробуваннях (табл.2.2, табл.2.3, рис 2.23) вказує на додатну збіжність (відхилення не більше 11%) результатів досліджень.

При промисловому масштабуванні запропонованої системи дистанційного моніторингу важливим аспектом, очевидно, буде аналіз впливу на роботу обертового трансформатора магнітного поля розсіювання лобової частини статорної обмотки ПЕМП. Основними етапами розрахунку магнітного поля розсіювання лобової частини є визначення її форми та розмірів (виліт, радіус кривизни), розрахунок ампер-витків лобової частини, застосування методу відображень або чисельних методів. Магнітна індукція полів розсіювання лобових частин розраховується шляхом визначення коефіцієнта магнітної провідності лобового розсіювання та намагнічувальної сили лобових частин і здійснюється за формулою:

$$B_l = \frac{\sqrt{2} I_1 \cdot w_1 \cdot k_l \cdot \lambda_l}{2L_l} \quad (2.41)$$

де I_1 – струм фази, w_1 – кількість витків, k_l – обмотувальний коефіцієнт, L_l – довжина лобової частини, λ_l – коефіцієнт магнітної провідності.

Для експериментального зразка ПЕМП шляхом вимірів зафіксовано рівень індукції полів розсіювання лобових частин обмотки статора, який не перевищував 64 мкТ, може бути віднесений до слабких магнітних полів ($H < 500$ А/м, $0,0001$ Т) і практично не впливає на роботу обертового трансформатора. При нарощуванні потужності і габаритів ПЕМП цей рівень безумовно буде підвищуватись і тому нівелювання впливу на роботу обертового трансформатора потрібно при необхідності регулювати шляхом екранування або вибору відстані між означеними електромеханічними частинами.

2.9. Дослідження динамічних режимів роботи системи моніторингу

Працездатність та метрологічна надійність апаратно-програмного комплексу в реальних умовах експлуатації визначається його поведінкою в динамічних режимах. Оскільки живлення роторного вимірювального вузла здійснюється від повітряного обертового трансформатора імпульсно, а навантаження має яскраво виражений змінний характер (ініціалізація, конверсія, радіопередача), критично важливим є дослідження перехідних процесів у системі безконтактної передачі енергії (СБПЕ) та підтвердження стабільності напруги живлення мікроконтролера.

Для оцінки динамічних властивостей повітряного обертового трансформатора та обґрунтування вибору робочої частоти було проведено серію експериментальних вимірювань. На первинну обмотку подавався змінний ШІМ-сигнал прямокутної форми від напівмостового перетворювача. Оскільки напівмостова топологія формує на виході змінну напругу, діюче (RMS) значення якої становить приблизно половину від вхідної, на первинну обмотку прикладалася напруга близько 6–6,5 В. Частота перемикання транзисторів варіювалася в діапазоні від 1,5 до 7 кГц.

Дослідження проводилися для трьох значень осьової відстані (зазору) між торцями первинної та вторинної обмоток: 4 мм, 5,3 мм та 7,3 мм. Номінальним (робочим) зазором для експериментального стенда було обрано відстань 4 мм. Такий вибір є інженерним компромісом: він гарантовано дозволяє уникнути механічного тертя між статором і ротором, компенсуючи можливі неточності (биття) при

виготовленні та збиранні макета ручним способом, і водночас забезпечує прийнятний рівень магнітного зв'язку. У таблиці 2.4 подано результати випробувань обертового трансформатора в крайніх режимах – неробочого ходу та короткого замикання.

Таблиця 2.4

Експериментальні дані випробувань трансформатора в режимі неробочого ходу та короткого замикання

Осьова відстань між обмотками, мм	f, kHz	Режим неробочого ходу			Режим короткого замикання		
		U_{im1} , V	U_{im2} , V	I_{im1} , A	U_{scm1} , V	I_{scm1} , A	I_{scm2} , A
4	4,07	12,392	4,86	0,055	12,36	0,099	0,198
	3,05	12,372	5,48	0,088	12,30	0,201	0,325
	2,04	12,297	8,02	0,212	12,12	0,489	0,567
	1,52	12,197	10,6	0,371	12,28	0,241	0,354
5,3	4,05	12,394	4,47	0,056	12,37	0,088	0,169
	3,04	12,373	5,12	0,088	12,32	0,172	0,274
	2,02	12,287	7,62	0,218	12,10	0,496	0,545
	1,52	12,184	10,05	0,372	12,27	0,246	0,398
7,3	4,03	12,395	4,01	0,056	12,39	0,07	0,116
	3,01	12,374	4,62	0,089	12,35	0,133	0,191
	2,01	12,292	6,9	0,218	12,15	0,445	0,447
	1,52	12,197	9,2	0,37	12,45	0,295	0,342

Аналіз отриманих осцилограм та табличних даних показує, що в режимі неробочого ходу амплітуда індукованої напруги на вторинній обмотці закономірно зростає зі зниженням частоти від 4 до 1,5 кГц. У режимі короткого замикання струм вторинної обмотки обмежується переважно реактивним (індуктивним) опором витків. Зі зростанням частоти індуктивний лінійно зростає, що призводить до відповідного зменшення амплітуди струму. Для перевірки робочих характеристик системи з підключеним реальним навантаженням було проведено вимірювання, результати яких зведено у таблицю 2.5.

Таблиця 2.5

Експериментальні дані випробувань трансформатора в режимі навантаження

Осьова відстань між обмотками, mm	f, kHz	U_{lm1} , V	U_{lm2} , V	I_{lm1} , A	I_{lm2} , A
4	4,07	12,382	2,96	0,071	0,044
	3,05	12,359	3,54	0,11	0,053
	2,04	12,28	4,53	0,241	0,068
	1,52	12,212	4,74	0,349	0,071
5,3	4,05	12,386	2,71	0,069	0,04
	3,04	12,36	3,28	0,107	0,049
	2,02	12,272	4,35	0,245	0,067
	1,52	12,2	4,57	0,352	0,068
7,3	4,03	12,39	2,14	0,064	0,032
	3,01	12,365	2,73	0,103	0,04
	2,01	12,28	3,92	0,242	0,058
	1,52	12,206	4,2	0,357	0,062

За результатами вимірювань побудовано графічні залежності потужності та ККД (рис.2.23), які доводять, що зі збільшенням осьового зазору від 4 мм до 7,3 мм передавана потужність закономірно падає через зростання потоків розсіювання. Оптимальним режимом роботи для зазору 4 мм визнано частоту 2 кГц. Саме на цій частоті досягається необхідний баланс: достатня індукована напруга (близько 4,5 В під навантаженням) та помірні струми споживання, що мінімізує теплові втрати в системі живлення. Зростання частоти вище 3–4 кГц призводить до стрімкого падіння струму через реактивний опір, а зниження до 1,5 кГц – до невиправданого зростання струму намагнічування та нагріву первинної обмотки.

Енергетичний ККД та коефіцієнт передачі напруги. При аналізі ефективності системи безконтактного живлення необхідно чітко розмежовувати два параметри: енергетичний коефіцієнт корисної дії (ККД) та коефіцієнт передачі напруги. У зв'язку з тим, що обертовий трансформатор має суцільне феромагнітне осердя, значні повітряні зазори та працює в умовах великого магнітного розсіювання,

його енергетичний ККД становить близько 17%. Проте, враховуючи абсолютні значення потужності (передається 300–500 мВт, споживається від мережі близько 2–3 Вт), такі втрати є абсолютно мізерними на фоні кіловатних потужностей самого ПЕМП і не впливають на загальний енергобаланс установки.

Натомість, критичним для функціонування мікроелектроніки є коефіцієнт передачі напруги. При живленні первинного інвертора напругою 12,28 В (діюча напруга на первинній обмотці $V_{вх} / 2 = 6,14$ В), вихідна напруга на вторинній обмотці становить 4,53 В при частоті 2,04 кГц. Отже, коефіцієнт передачі напруги розраховується як:

$$K = \frac{V_{вих}}{V_{вх}/2} = \frac{4,53}{6,14} = 0,74 \quad (2.42)$$

Досягнуте значення 0,74 (або 74%) у поєднанні з випрямлячем на діодах Шоттки забезпечує надійне формування рівня напруги, достатнього для стабільної роботи вимірювального вузла. Для перевірки здатності трансформатора витримувати динамічні кидки струму було знято осцилограму повного робочого циклу роторного мікроконтролера (рис.2.24). Процес ініціалізації та збору даних чітко розбивається на 4 етапи:

1. Запуск та стабілізація: Після подачі ШІМ-сигналу на первинну обмотку напруга на вторинній стороні (на буферному конденсаторі ємністю 4700 мкФ) зростає експоненціально і менш ніж за 100 мс досягає робочого рівня. Для захисту схеми від можливих перенапруг на холостому ходу паралельно навантаженню встановлено стабілітрон (з напругою стабілізації 5,1 В).

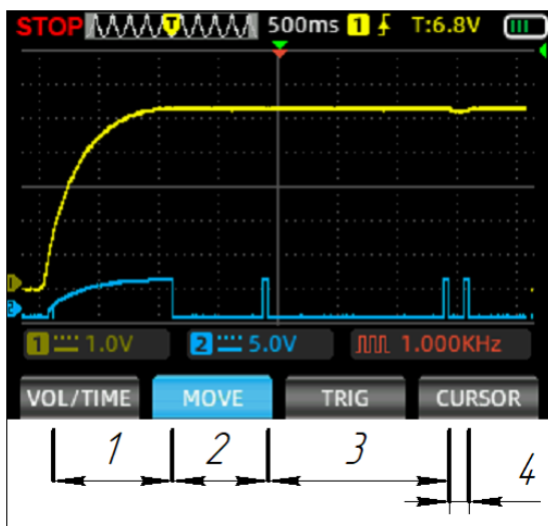


Рис. 2.24. Осцилограма повного циклу роботи мікроконтролера:

1 – затримка 1 секунда після включення; 2 – Запит на вимірювання температури цифровими температурними датчиками DS18B20; 3 – послідовне зчитування температури з кожного з 13 датчиків; 4 - передача даних радіоканалом.

Джерело: розроблено автором.

Напруга в системі стабілізується на безпечному рівні. Мікроконтролер LGT8F328P витримує 1 секунду паузи для гарантованого завершення перехідних процесів.

2. Ініціалізація датчиків: Мікроконтролер подає команду всім 13-ти датчикам DS18B20 на початок вимірювання температури.

3. Зчитування даних: Після завершення вимірювання мікроконтролер послідовно опитує всі датчики з інтервалом 100 мс. Послідовне опитування дозволяє уникнути одночасного стрибка струму споживання, гарантуючи рівномірне навантаження на обертовий трансформатор. Напруга на цьому етапі залишається ідеально стабільною.

4. Передача радіотелеметрії: Найбільш енергозатратний етап циклу. Радіомодуль JDY-40 виводиться з режиму сну та здійснює передачу сформованого пакета даних. Імпульсне споживання струму передавачем призводить до незначного просідання напруги на буферному конденсаторі. Однак, завдяки достатній ємності фільтра та можливостям трансформатора, напруга не опускається нижче критичного рівня, що гарантує відсутність перезавантажень мікроконтролера. Важливо зазначити схемотехнічну роль стабілітрона у цей момент: як тільки напруга просідає нижче його порогу стабілізації, він миттєво припиняє проводити струм і "вимикається" зі схеми. Таким чином, він не розсіює дорогоцінну енергію в момент максимального навантаження, дозволяючи використати весь накопичений заряд конденсатора виключно на корисну роботу радіопередавача. Відразу після успішної передачі пакета та підтвердження контрольної суми (CRC) на стороні статора, головний контролер знімає живлення з первинної обмотки.

2.10. Розробка трифазного симісторного регулятора напруги

Причиною розробки власного трифазного симісторного регулятора напруги стала відсутність на ринку економічно доступних рішень, які б повною мірою задовольняли вимоги специфічного керування заглибним ПЕМП. Більшість існуючих комерційних пристроїв або мають надлишкову функціональність (наприклад, повноцінні частотні перетворювачі), що невиправдано збільшує вартість системи, або

мають закриту архітектуру, яка унеможлиблює гнучку інтеграцію з мікроконтролерними системами для вільного налаштування алгоритмів керування.

Враховуючи, що для виконання необхідного технологічного процесу перемішування та нагрівання субстрату достатньо зміни діючого значення напруги при фіксованій частоті мережі 50 Гц, використання складного керування частотою було визнано недоцільним. Фазове регулювання напруги за допомогою двоспрямованих тиристорів (симісторів) є перевіреним та ефективним методом керування режимами роботи асинхронних машин. Розроблений регулятор оснащений функцією плавного пуску, що забезпечує поступове наростання напруги і повністю усуває проблему критичних пускових струмів та механічних ударів під час запуску ПЕМП.

Разом з тим, керування потужним індуктивним навантаженням за допомогою напівпровідникових ключів супроводжується ризиком виникнення високовольтних комутаційних перенапруг та ймовірністю магнітного насичення статора у разі навіть незначної асиметрії фазового керування. Це обумовило необхідність комплексного підходу до проектування, що включає розробку власної апаратної бази, написання неблокуючого програмного забезпечення та вдосконалення системи захисту і детектування нуля. Програмне забезпечення симісторного регулятора напруги, яке побудоване на принципах неблокуючої архітектури, представлено у Додатку А.

2.10.1. Апаратне забезпечення та схемотехнічні рішення симісторного регулятора напруги

Принципова електрична схема симісторного регулятора напруги зображена на рис.2.25. Основою розробленого симісторного регулятора є мікроконтролер архітектури ESP32-S2, який було обрано завдяки високій обчислювальній потужності та наявності спеціалізованих апаратних таймерів з високою роздільною здатністю, що є критично важливим для точного фазового керування силовими ключами в режимі реального часу. Використання даного мікроконтролера дозволяє забезпечити стабільну обробку сигналів від детекторів переходу через нуль одночасно по трьох

фазах без затримок, характерних для простіших восьмибітних обчислювальних систем.

Система живлення пристрою реалізована за двоступеневою ієрархічною схемою. Первинне перетворення мережевої напруги 220 Вольт у напругу постійного струму 5 Вольт здійснюється за допомогою компактного імпульсного модуля живлення, який характеризується високим коефіцієнтом корисної дії та широким діапазоном вхідних напруг. Проте, враховуючи високий рівень високочастотних пульсацій, притаманних імпульсним перетворювачам, для живлення логічної частини мікроконтролера та вимірювальних кіл додатково застосовано лінійний стабілізатор напруги серії AMS1117-3.3. Таке рішення дозволяє ефективно мінімізувати амплітуду завад на лініях живлення, забезпечуючи високу стабільність роботи аналого-цифрових перетворювачів та надійність виконання програмного коду. Вхідне коло блоку живлення захищене запобіжником номіналом 0,5 Ампера та варистором серії VCR-10D471K для запобігання пошкодженню електроніки внаслідок короткочасних сплесків напруги в мережі.

Детектування моменту переходу напруги через нульове значення реалізовано на базі спеціалізованих транзисторних оптопар змінного струму FOD814A. На відміну від стандартних схем з діодним мостом, використання оптопар з двома зустрічно-паралельними світлодіодами забезпечує повну симетрію детектування обох напівхвиль напруги. Це є ключовим фактором для запобігання виникненню постійної складової струму в обмотках статора двигуна, що виключає ризик його магнітного насичення та аварійного виходу з ладу силових ключів.

Виконавча частина регулятора побудована на високовольтних симісторах промислової серії TPDV1240. Дані компоненти мають робочу напругу до 1200 Вольт та максимальний струм до 40 Ампер, що забезпечує значний запас міцності при роботі з індуктивним навантаженням. Особливістю обраного типу корпусів TOP3 є наявність внутрішньої електричної ізоляції кристала від металевої підкладки, що дозволяє виконувати монтаж усіх трьох фаз на єдиний алюмінієвий радіатор без використання додаткових діелектричних прокладок, покращуючи теплові характеристики системи.

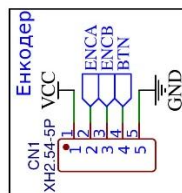
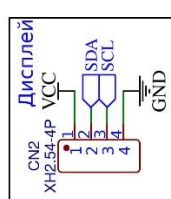
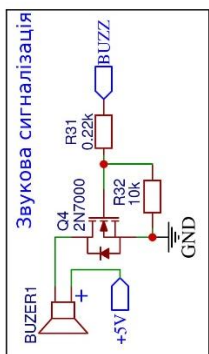
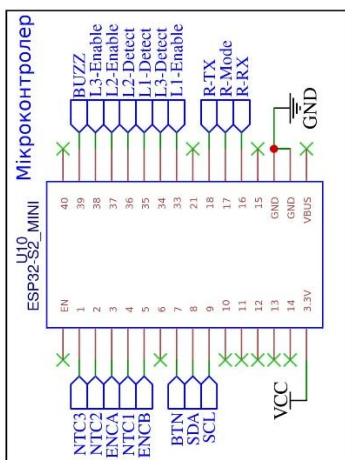
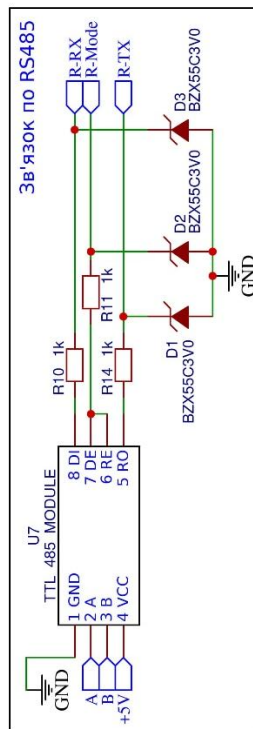
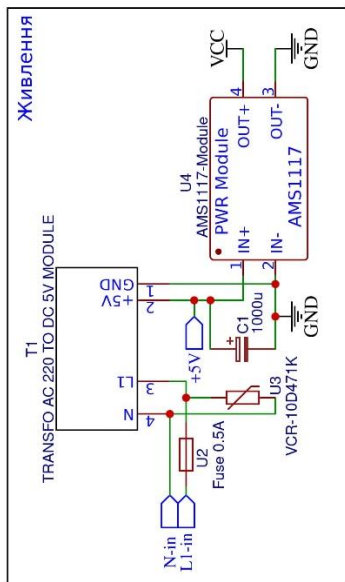
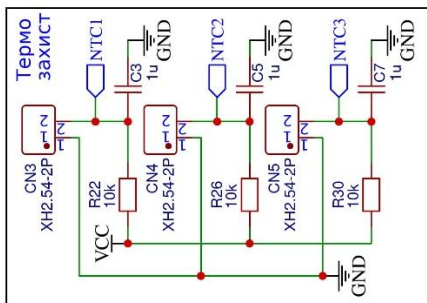
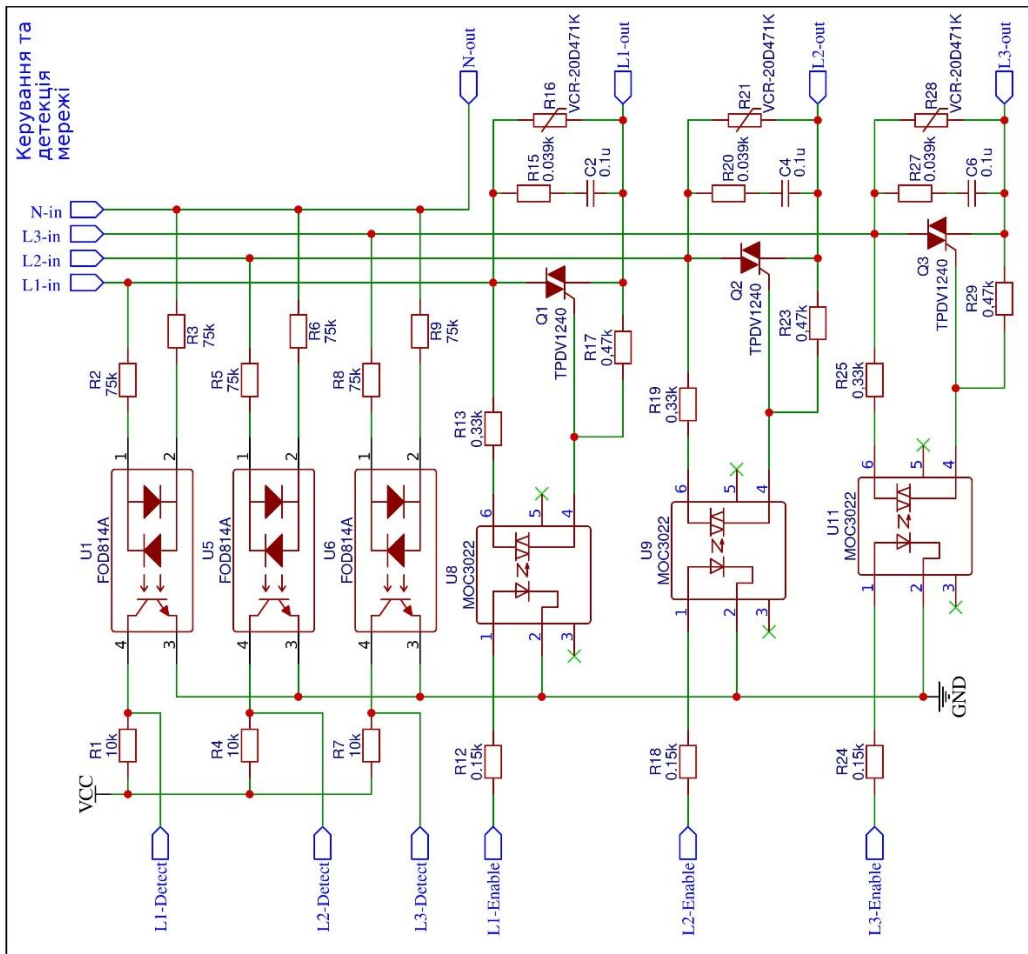
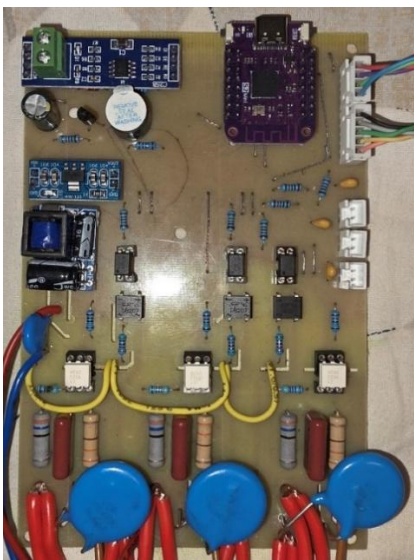


Рис. 2.25. Принципова електрична схема симисторного регулятора напруги

Джерело: розроблено автором

Для захисту силових ключів від комутаційних перенапруг та високої швидкості наростання напруги, паралельно кожному симістору встановлено RC-демферуючі ланцюги (снабери), що складаються з плівкових конденсаторів ємністю 0,1 мікрофарада та резисторів опором 39 Ом. Додатковий рівень захисту від індуктивних викидів двигуна забезпечують потужні варистори VCR-20D471K діаметром 20 міліметрів, які обмежують амплітуду напруги на рівні, безпечному для напівпровідникових структур.

Конструктивно пристрій виконано на друкованій платі, де силові доріжки посилені шаром припою для забезпечення проходження великих струмів (рис. 2.26). Для забезпечення безпеки експлуатації та захисту від зовнішніх впливів розроблено спеціалізований корпус, який передбачає наявність вентиляційних отворів для активного охолодження силового блоку та зручні органи керування у вигляді енкодера та рідкокристалічного дисплея.



а)



б)

Рис. 2.26. Симісторний регулятор: а – загальний вигляд плати; б – спроектований корпус симісторного регулятора

Джерело: розроблено автором

2.10.2. Програмна реалізація алгоритмів фазового керування та плавного пуску

Програмне забезпечення симісторного регулятора напруги (Додаток А) побудоване на принципах неблокуючої архітектури, що дозволяє виконувати декілька паралельних процесів без взаємних затримок. Основна логіка керування реалізована з використанням апаратних переривань та високоточних таймерів мікроконтролера моделі ESP32-S2, що забезпечує мікросекундну точність формування керуючих імпульсів для силових ключів.

Алгоритм фазового регулювання базується на точному визначенні моменту переходу мережевої напруги через нульове значення. При надходженні сигналу від детектора на відповідний вхід мікроконтролера ініціюється обробник зовнішнього переривання. У середині цього обробника запускається апаратний таймер зворотного відліку, тривалість якого визначає затримку відкриття симістора відносно початку напівхвилі. Після завершення відліку таймер генерує короткий імпульс тривалістю 100 мікросекунд на відповідний вихід керування, що забезпечує надійне відмикання силового напівпровідникового приладу.

Особливістю програмної реалізації є алгоритм плавного пуску, який описано як лінійне наростання кута відкриття симісторів. Замість миттєвого подання цільової напруги на обмотки перетворювача, програма (Додаток А) поступово зменшує затримку спрацювання симістора від максимального значення (близько 10 мілісекунд, що відповідає нульовій напрузі) до встановленого користувачем робочого рівня. Швидкість цього процесу регулюється окремою функцією, яка перераховує поточний крок заповнення кожні 10 мілісекунд, забезпечуючи плавність перехідних процесів та відсутність динамічних перевантажень у механічній частині системи.

Керування пристроєм здійснюється через інтерактивне меню, виведене на дисплей на основі органічних світлодіодів (рис.2.27). Програмна обробка сигналів від енкодера реалізована також на основі переривань, що виключає пропуски кроків при швидкому обертанні ручки керування. Для захисту від випадкових змін критичних параметрів, зміна значень заповнення напруги можлива лише при одночасному утриманні кнопки енкодера натиснутою. Оновлення інформації на дисплеї

виконується асинхронно із частотою не більше 20 кадрів на секунду, що дозволяє виділити основний час процесора для виконання завдань реального часу, пов'язаних із силовим керуванням.



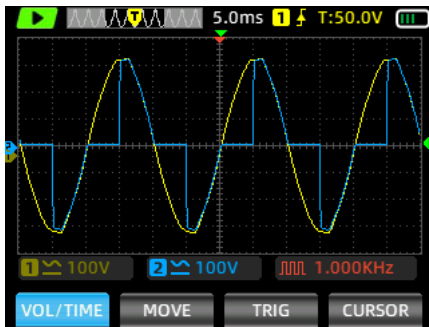
Рис. 2.27. Вигляд меню симісторного регулятора

Джерело: розроблено автором

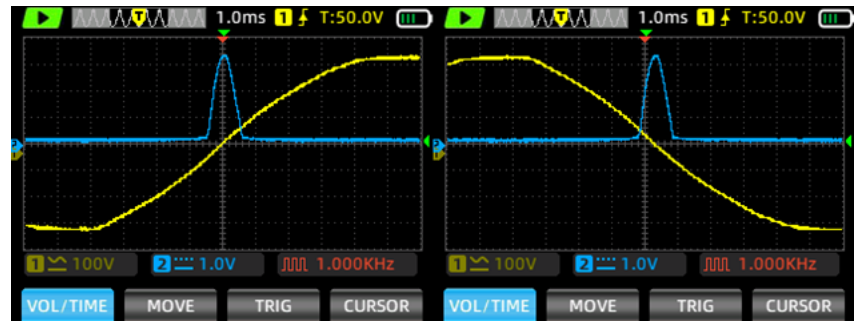
Така структура програмного забезпечення дозволяє пристрою стабільно функціонувати навіть при зміні параметрів навантаження в реальному часі, зберігаючи високу точність підтримки заданої напруги на кожній із трьох фаз.

2.10.3. Дослідження асиметрії фазового керування та модернізація системи захисту

Під час експериментальної експлуатації розробленого симісторного регулятора на знижених рівнях потужності (в діапазоні від 10 до 13,7 відсотків заповнення) було зафіксовано критичний збій, що супроводжувався термічним руйнуванням корпусу силового напівпровідникового ключа. Аналіз кривих напруги, отриманих за допомогою цифрового осцилографа, виявив наявність суттєвої аномалії: тривалість відкритого стану симістора для позитивної та негативної напівхвиль напруги живлення не була ідентичною (рис.2.28). Детальні вимірювання логічного сигналу від детектора переходу через нуль підтвердили, що апаратний синхронізуючий імпульс формувався несиметрично відносно справжнього нульового рівня синусоїди електричної мережі. Зсув у часі між фронтами для зростаючої та спадної напівхвиль досягав 200 мікросекунд. Подібне несиметричне відмикання симістора під час керування індуктивним навантаженням є однією з найбільш складних проблем.



а)



б)

Рис. 2.28. Осцилограми напруги симісторного регулятора: а – на навантаженні з різною шпаруватістю; б – сигналів детектора переходу через нуль

Джерело: розроблено автором

Неоднакова тривалість провідного стану генерує різницю площ напруг протилежної полярності, що фізично означає появу постійної складової струму, яка прикладається до обмоток статора двигуна. Оскільки активний опір мідних обмоток електромеханічного перетворювача є надзвичайно малим (на рівні 0,35 Ом), навіть мікросекундна асиметрія призводить до поступового накопичення постійного магнітного поля, яке з часом вводить магнітопровід двигуна у стан глибокого магнітного насичення. У стані насичення індуктивний опір обмотки стрімко падає майже до нульового значення, що викликає миттєвий ударний надструм, який багаторазово перевищує номінальні параметри напівпровідника і неминуче призводить до фізичного руйнування кристала симістора.

Для усунення першопричини цієї асиметрії схему детектування нуля було фундаментально модернізовано. Початкову конфігурацію, що складалася з діодного моста та односпрямованої транзисторної оптопари, було вилучено та замінено на спеціалізовану двоспрямовану оптопару змінного струму серії FOD814A. Вилучення діодного моста з електричного кола дозволило повністю позбутися похибок вимірювання, пов'язаних із неоднаковим падінням напруги на різних напівпровідникових діодах. Натомість використання двох зустрічно-паралельних інфрачервоних світлодіодів, інтегрованих усередині оптопари FOD814A, забезпечило ідеально рівні пороги спрацювання як для позитивної, так і для негативної напівхвиль

напруги. Така модернізація апаратної частини гарантувала, що керуючі імпульси почали формуватися строго симетрично, повністю виключивши можливість генерування постійної складової струму в індуктивному навантаженні.

Як додатковий захід для забезпечення безперебійної роботи модернізованої системи, паралельно силовим ключам було інтегровано промислові металооксидні варистори. У моменти різкого переривання значних струмів масивні обмотки двигуна діють як джерело енергії, створюючи високовольтні сплески електрорушійної сили самоіндукції. Встановлені варистори ефективно поглинають цю надлишкову енергію, жорстко обмежуючи напругу на контактах симісторів до безпечного рівня, чим суттєво підвищують загальну відмовостійкість системи фазового керування.

Висновки до розділу 2

У другому розділі здійснено теоретичне обґрунтування та розробку ключових компонентів електротехнічного комплексу:

1. Обґрунтовано концепцію побудови комплексу, яка базується на поєднанні заглибного поліфункціонального перетворювача (ПЕМП) для термомеханічного впливу та пристрою автоматичного контролю (ПАК) для високоточного моніторингу.

Дослідження динамічних режимів підтвердило повну функціональну придатність розробленої системи безконтактного моніторингу. Незважаючи на низький енергетичний ККД (17%), властивий трансформаторам з великим повітряним зазором (4 мм), досягнутий коефіцієнт передачі напруги (74%) у синергії з випрямлячем на діодах Шотткі, відмовою від лінійних LDO-стабілізаторів та використанням обмежувального стабілітрона забезпечує абсолютну стабільність живлення на всіх етапах вимірювального циклу. Розроблений інтелектуальний імпульсний алгоритм опитування повністю усуває проблему паразитного нагріву ПЕМП струмами намагнічування, забезпечуючи високу метрологічну достовірність експериментальних досліджень біогазового реактора.

У результаті проведеного комплексу розрахункових та дослідно-конструкторських робіт було успішно спроектовано, виготовлено та протестовано

мікропроцесорний трифазний симісторний регулятор напруги, спеціалізований для керування режимами роботи заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

Аналіз результатів розробки дозволяє сформулювати наступні основні висновки:

- Застосування мікроконтролера ESP32-S2 з неблокуючою програмною архітектурою та використанням високоточних апаратних таймерів дозволило реалізувати стабільне фазове керування одночасно по трьох фазах у режимі реального часу. Впровадження програмного алгоритму лінійного наростання кута відкриття симісторів повністю вирішило проблему критичних пускових струмів, забезпечивши плавний вихід механічної системи на заданий технологічний режим без динамічних ударів.

- Експериментальні дослідження виявили критичну вразливість класичної схеми детектування нуля на базі діодного моста під час роботи з потужним індуктивним навантаженням. Доведено, що навіть мікросекундна асиметрія у формуванні керуючих імпульсів призводить до генерації постійної складової струму, швидкого магнітного насичення осердя статора та виникнення аварійних ударних надструмів.

- Фундаментальна модернізація системи синхронізації шляхом інтеграції спеціалізованих двоспрямованих оптопар змінного струму серії FOD814A дозволила досягти абсолютної симетрії відмикання силових ключів. Це усунуло першопричину появи струмів насичення і забезпечило стабільну роботу двигуна на будь-яких рівнях потужності.

- Комплексний підхід до побудови системи апаратного захисту, який включає використання високовольтних симісторів серії TPDV1240, демпферуючих резистивно-ємнісних кіл та промислових металооксидних варисторів, гарантує надійне поглинання енергії самоіндукції двигуна та стійкість пристрою до комутаційних перенапруг.

Розроблений апаратно-програмний комплекс є надійним, економічно обґрунтованим та повністю завершеним рішенням, яке забезпечує гнучке керування

технологічними процесами перемішування та нагрівання субстрату, значно підвищуючи загальну енергетичну та експлуатаційну ефективність електромеханічної системи.

Обґрунтовано використання трансформатора з вторинною обмоткою, що обертається, для безконтактної передачі енергії на обертову частину заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача у складі електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора. Методологія побудови обертового трансформатора оцінена експериментально і отриманий прототип демонструє середню ефективність 75% у діапазоні вихідної потужності 300–500 мВт. Запропонована математична модель обертового трансформатора при чисельних розрахунках демонструє придатну збіжність з експериментальними даними. Запропонована топологія дає можливість нарощувати потужність трансформатора, що обертається, без шкоди для його розміру, вартості або продуктивності.

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ

3.1. Обґрунтування принципів створення пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння

Ефективне керування біотехнологічним процесом у біогазовому реакторі вимагає наявності достовірної інформації про поточний стан середовища. Ключовими параметрами, що визначають стабільність метаногенезу, є водневий показник (рН), окисно-відновний потенціал (Redox або ОВП), температура та електропровідність субстрату. Відхилення цих параметрів від оптимальних значень може свідчити про початок процесів закислення (накопичення летких жирних кислот) або інгібування бактерій токсичними речовинами [30, 34].

Проте, як зазначалося в огляді літератури, використання стаціонарних занурюваних датчиків у біогазових установках пов'язане з низкою технічних проблем. Біогазовий субстрат є агресивним, гетерогенним середовищем з високою біологічною активністю. Вже через 6–12 годин перебування датчика у субстраті на його чутливій поверхні (скляній мембрані рН-електрода або платиновій поверхні Redox-електрода) утворюється стійка біоплівка. Це явище, відоме як «біофоулінг» (biofouling), призводить до збільшення часу відгуку сенсора, появи дрейфу показань та суттєвої похибки вимірювань, яка може досягати 0,5–1,0 од. рН [33]. У промислових умовах це вимагає частого (щоденного) виймання датчиків для ручного очищення та калібрування, що є трудомістким процесом і порушує герметичність реактора.

Для вирішення цієї проблеми розроблено спеціалізований **пристрій для автоматичного контролю параметрів (ПАК)**, конструкція якого захищена Патентом України № 153026 на корисну модель [38]. Основна ідея розробки полягає в автоматизації повного циклу обслуговування вимірювальних зондів безпосередньо на кришці реактора без участі оператора.

Конструктивна схема та принцип дії пристрою. Розроблений пристрій (рис. 3.1) являє собою електромеханічний модуль, що монтується на верхній кришці біореактора через стандартний фланцевий з'єднувач. Конструктивно пристрій складається з трьох основних функціональних вузлів: вузла переміщення датчиків, системи очищення та блоку калібрування/паркування.

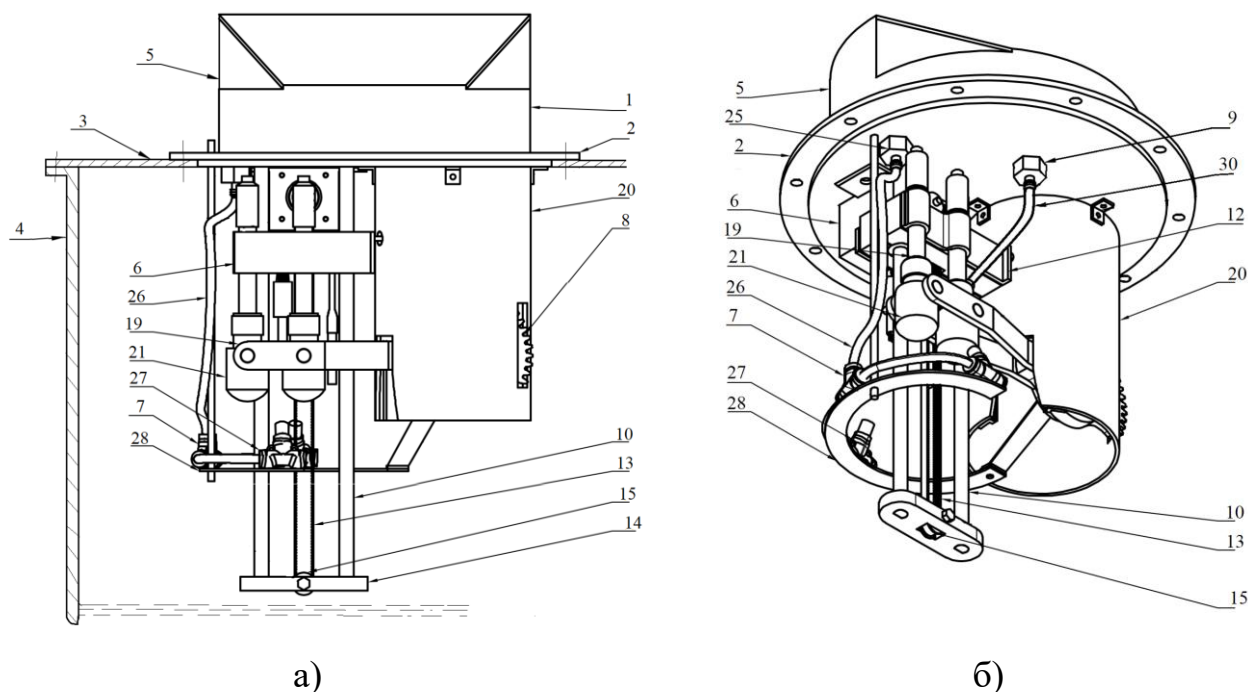


Рис. 3.1. Загальний вигляд пристрою автоматичного контролю (а) та його ізометрична проєкція (б): 1 - пристрій для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах; 2 - монтажний фланець; 3 - кришка біогазового реактора; 4 - біогазовий реактор; 5 - ізотермічний контейнер; 6 - вузол рухомої каретки; 7 - система очищення; 8 - рухома система захисних ковпачків і калібрувальних ємностей; 9 - вузол подавання калібрувальних рідин; 10 - лінійні напрямні; 11 - кроковий двигун з зубчастим шківом; 12 - каретка; 13 - ремінь переміщення каретки; 14 - кінцева планка; 15 - натяжний ролик ремня переміщення каретки; 19 - виносні на кабелі давачі; 20 - захисний корпус; 21 - захисні ковпачки; 26 - трубопровід для подачі води; 27 - розпилювач; 28 - нерухома дугоподібна пластина; 30 - трубопровід вузла подавання очищувальних рідин.

Джерело: сформовано автором на основі джерела [38].

Вузол лінійного переміщення. Основою механічної частини є нерухома рама, на якій закріплено дві вертикальні циліндричні напрямні. По напрямних рухається каретка, на якій жорстко зафіксовано тримачі для набору датчиків (рН, ОВП, температури, кондуктометр тощо). Привод каретки здійснюється за допомогою крокового електродвигуна через пасову передачу (зубчастий пас) або передачу «гвинт-гайка». Використання крокового двигуна дозволяє точно позиціювати датчики по висоті, реалізуючи функцію вимірювання профілю параметрів на різній глибині занурення [35]. У верхньому положенні (режим очікування) датчики знаходяться будучи закритими захисними ковпачками, що ізолює їх від зовнішнього середовища та біогазу в середині біореактора.

Система гідрострумного очищення. Для видалення залишків субстрату та біоплівки з поверхні сенсорів після кожного вимірювання передбачена автоматична система промивання. Вона складається з напорної помпи, резервуара з промивною рідиною (технічна вода або слабкий розчин кислоти) та блоку форсунок-розпилювачів. Форсунки розташовані таким чином, щоб струмені рідини під тиском перекривали робочі поверхні всіх встановлених датчиків. Конфігурація факела розпилення та тиск підібрані так, щоб забезпечити ефективне механічне видалення забруднень без пошкодження чутливих мембран електродів.

Блок калібрування та паркування. Унікальною особливістю ПАК є наявність механізму автоматичного калібрування. Він реалізований у вигляді набору контейнерів (склянок) з буферними розчинами (наприклад, рН 4.01 та рН 7.00), які можуть автоматично підводитися під датчики, коли каретка знаходиться у верхньому положенні. Це реалізується за допомогою додаткового сервоприводу, який повертає платформу з контейнерами. У режимі «Паркування» (між вимірюваннями) датчики занурюються в контейнер з розчином для зберігання (наприклад, 3М хлориду калію KCl), що запобігає пересиханню електроліту та деградації електрода порівняння.

Алгоритм роботи пристрою. Функціонування ПАК відбувається за циклограмою, яка задається контролером системи керування. Типовий цикл вимірювання включає такі етапи:

1. **Старт циклу:** За командою таймера або оператора система виводить датчики з паркувальної ємності.
2. **Занурення:** Кроковий двигун опускає каретку вниз, вводячи зонди в робочу зону реактора на задану глибину. Глибина може змінюватися для сканування шарів субстрату.
3. **Вимірювання:** Датчики витримуються у середовищі протягом часу, необхідного для стабілізації показів (зазвичай 1–3 хв). Дані зчитуються контролером, усереднюються та передаються в загальну систему моніторингу.
4. **Підйом:** Каретка підіймається у верхнє положення (зону очищення).
5. **Очищення:** Вмикається помпа подачі промивної рідини. Форсунки формують конічні струмені, що змивають біомасу з датчиків. Відпрацьована рідина стікає назад у реактор або у спеціальний дренаж.
6. **Паркування/Калібрування:**
 - У штатному режимі: датчики опускаються в ємність для зберігання.
 - У режимі обслуговування (наприклад, раз на тиждень): під датчики підводяться калібрувальні розчини, і контролер виконує процедуру перевірки та корекції характеристик електродів.

Переваги запропонованого технічного рішення порівняно з аналогами:

- **Висока достовірність даних:** Регулярне очищення та калібрування усувають вплив дрейфу та забруднення, забезпечуючи лабораторну точність вимірювань у промислових умовах.
- **Збільшення ресурсу сенсорів:** Зберігання електродів у спеціальному розчині замість постійного перебування в агресивному субстраті збільшує термін їх служби у 3–5 разів.
- **Універсальність:** Пристрій дозволяє використовувати стандартні промислові або лабораторні датчики будь-яких виробників, що спрощує ремонт та модернізацію.
- **Комплексність:** Можливість одночасного вимірювання профілю температури, рН та інших параметрів по глибині реактора дає повну картину протікання процесу бродіння та ефективність перемішування.

3.2. Математичне моделювання гідродинамічних процесів у системі розпилення промивної рідини та очищення сенсорів

Для дослідження процесів формування струменя та його взаємодії з поверхнями датчиків було застосовано методи обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD). Моделювання проводилося у програмному середовищі Ansys Fluent, що дозволяє з високою точністю аналізувати багатофазні потоки з урахуванням турбулентності [35].

Постановка задачі та фізична модель. Об'єктом моделювання є процес розпилення промивної рідини (води) через систему форсунок на робочі поверхні сенсорів, розташованих на рухомій каретці пристрою. Розрахункова область була визначена як прямокутний паралелепіпед, що відповідає внутрішньому простору камери очищення (рис. 3.2).

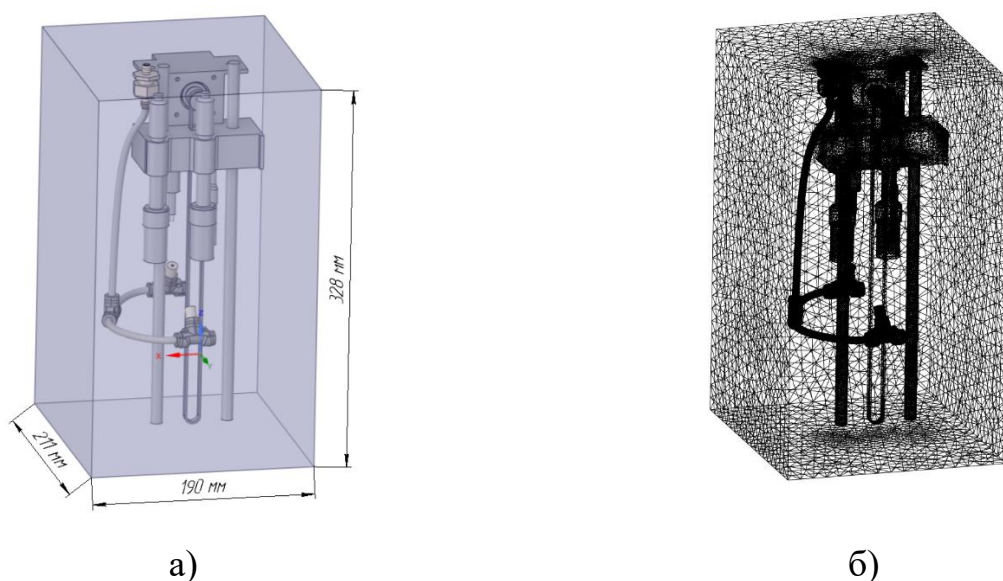


Рис.3.2. Розрахункова область моделювання: а - розрахункова схема; б - сітка.

Джерело: розроблено автором.

Для дискретизації розрахункової області побудовано неструктуровану розрахункову сітку, що складається з понад 330 000 вузлів та 1 760 000 елементів. Згущення сітки виконано в зонах високих градієнтів швидкостей – поблизу вихідних отворів сопел та поверхонь сенсорів, що забезпечує адекватне відтворення структури струменя [35].

Математична модель. Процес розпилення розглядається як течія двофазного середовища «рідина – газ» (вода – повітря). Для опису руху рідини використано систему рівнянь Нав'є-Стокса, осереднених за Рейнольдсом (RANS), доповнену рівнянням нерозривності. Враховуючи високу швидкість витікання рідини із сопел малого діаметра (0,2–1,0 мм) та інтенсивне перемішування з повітрям, потік характеризується розвиненою турбулентністю. Для замикання системи рівнянь обрано модель турбулентності **k-omega (k- ω)**, а саме її модифікацію SST (Shear Stress Transport). Ця модель ефективно поєднує переваги k-epsilon моделі (для вільного потоку) та k-omega моделі (для пристінних шарів), що є критичним для задач розпилення та взаємодії струменя з твердими стінками [35].

Рівняння переносу для кінетичної енергії турбулентності k має вигляд:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\sigma_k \mu_t}{\rho} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3.1)$$

Рівняння для питомої швидкості дисипації ω записується як:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = & \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\sigma_\omega \mu_t}{\rho} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ & + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (3.2)$$

де ρ – густина рідини або газу (кг/м^3); u_i – компоненти швидкості в напрямку i (м/с); μ – динамічна в'язкість рідини або газу ($\text{Па}\cdot\text{с}$); μ_t – турбулентна в'язкість ($\text{Па}\cdot\text{с}$); P_k – термін виробництва кінетичної енергії турбулентності, який описує процес перетворення швидкості потоку на турбулентну кінетичну енергію.

Турбулентна в'язкість визначається як:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.3)$$

Термін виробництва кінетичної енергії турбулентності визначається за формулою:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.4)$$

де: β^* – емпірична константа моделі k - ω (безрозмірна), зазвичай дорівнює 0.09; α – емпірична константа моделі k - ω (безрозмірна), зазвичай дорівнює 5/9; β –

емпірична константа моделі $k-\omega$ (безрозмірна), зазвичай дорівнює 0.075; σ_k – емпірична константа моделі $k-\omega$, яка впливає на дифузію k (безрозмірна), зазвичай дорівнює 2.0; σ_ω – емпірична константа моделі $k-\omega$, яка впливає на дифузію ω (безрозмірна), зазвичай дорівнює 2.0; $\sigma_{\omega 2}$ – додаткова емпірична константа для комбінованої моделі (безрозмірна); F_1 – функція блендінгу, яка використовується для комбінації моделі $k-\omega$ з іншими моделями (наприклад, з $k-\epsilon$ у SST-моделі) (безрозмірна). Ця функція визначає, яка частина комбінованої моделі використовується в конкретній області потоку [35].

Граничні умови та параметри моделювання. Як вхідні параметри моделі використано експериментальні навантажувальні характеристики помпи системи очищення. Для забезпечення коректності моделювання було проведено серію експериментів на лабораторному стенді із використанням високошвидкісного реєстратора даних, частота опитування якого близько 120 вимірювань на секунду [35].

Встановлено, що при номінальній напрузі живлення 12 В помпа забезпечує витрату рідини на рівні 5 л/хв при тиску до 6,8 бар. Розрахункова швидкість входу рідини в область моделювання становила 0,0353 м/с. На виході з розрахункової області задано умову вільного витікання в атмосферу (надлишковий тиск 0 Па). Крок за часом при нестационарному моделюванні обрано рівним 0,1 с, що дозволило детально відтворити динаміку розвитку факела розпилення.

Результати чисельного моделювання. Основним варійованим параметром у дослідженні був діаметр вихідного отвору форсунки (d_c). Моделювання проводилося для діапазону діаметрів від 0,2 мм до 1,0 мм з кроком 0,1–0,2 мм.

Перевірка достовірності математичної моделі для форсунок окремо від пристрою дозволила проаналізувати їх вільну поведінку, забезпечуючи точні умови для перевірки і встановлення відповідності моделі реальним фізичним параметрам. На рис.3.3 представлені результати моделювання та експериментальних досліджень розподілення струменів і форми конуса розбризкування рідини залежно від зміни діаметрів сопел розпилювачів. Результати моделювання демонструють високу точність і надійність математичної моделі, що є важливою передумовою для

подальшого комплексного моделювання та оптимізації роботи всього пристрою в цілому.

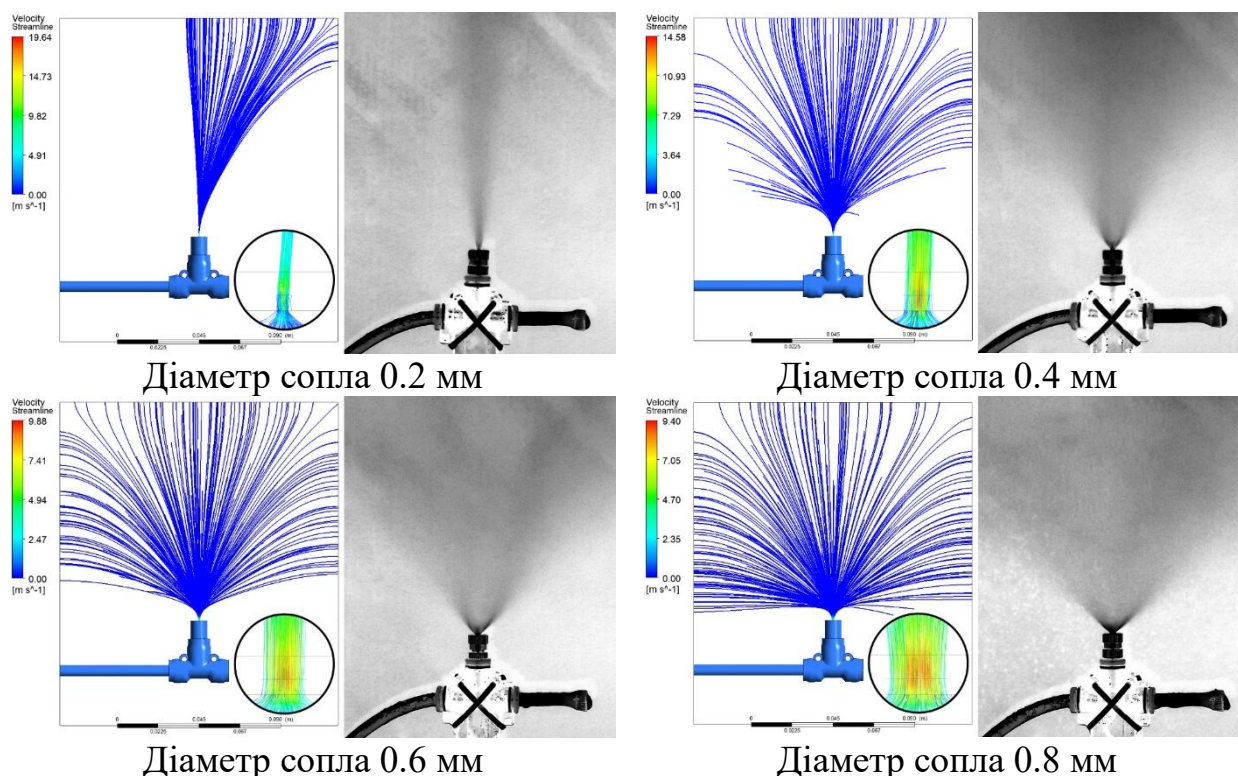
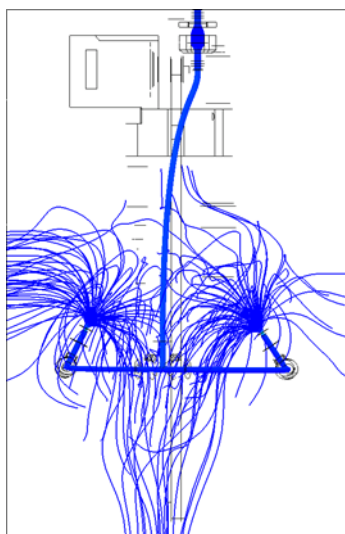


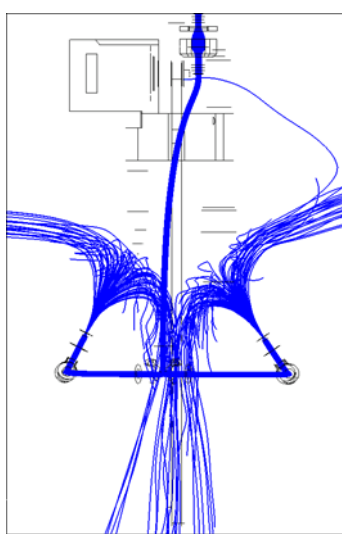
Рис. 3.3. Розподілення струменів та форма конуса розбризкування рідини в залежності від зміни діаметрів сопел форсунок: ліворуч – результат моделювання; праворуч – експеримент

Рис.3.3 наочно підтверджує адекватність математичної моделі гідродинамічних процесів експериментальним даним. Після було додатково проведено моделювання на реальній моделі пристрою для окремих форсунок при наявності в області подачі промивної рідини для очищення щонайменше чотирьох давачів. Результати моделювання (рис. 3.4) включають в себе аналіз ліній потоку (Streamline), що дає уявлення про форму конусу розпилення рідини при наявності двох форсунок у пристрої для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах.

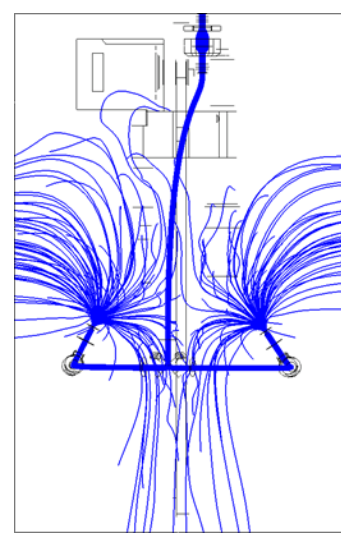
Діаметр сопла 0.7 мм



Діаметр сопла 0.8 мм

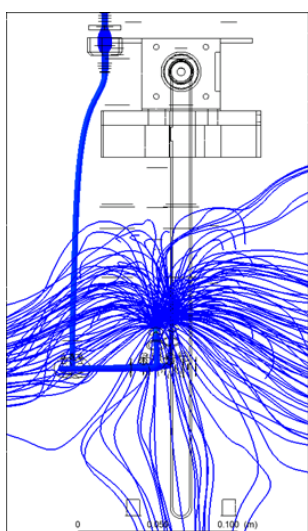


Діаметр сопла 0.9 мм

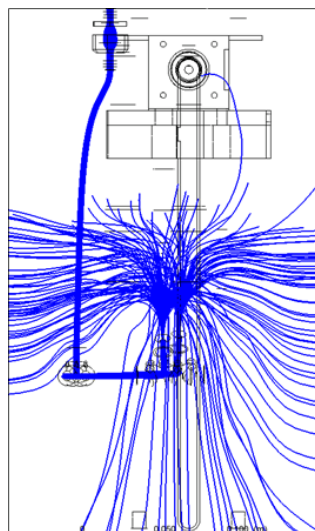


а)

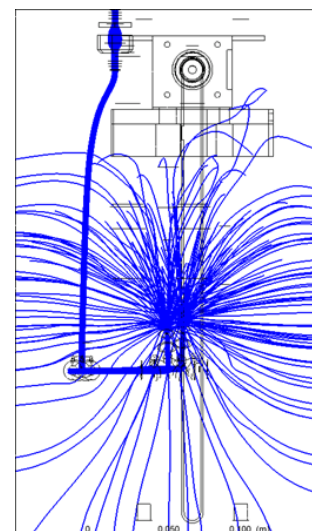
Діаметр сопла 0.7 мм



Діаметр сопла 0.8 мм



Діаметр сопла 0.9 мм



б)

Рис. 3.4. Розподіл ліній потоку та конус розпилення рідини при зміні діаметрів сопел форсунок: а - площина YZ; б - площина XZ

Джерело: розроблено автором.

Аналіз отриманих полів швидкостей (Streamlines) дозволив виявити такі закономірності:

1. Діапазон діаметрів сопла 0,2–0,4 мм: Струмінь має високу кінетичну енергію та малий кут розкриття факела. Рідина рухається вузьким ламінарним потоком, що забезпечує високу ударну силу в точці контакту, але покриває малу площу

сенсора. Такий режим є ефективним для точкового очищення, але вимагає прецизійного позиціонування форсунки відносно датчика. Крім того, виникає ризик механічного пошкодження чутливих елементів через надмірний локальний тиск.

2. Діапазон діаметрів сопла 0,6–0,8 мм: Спостерігається перехід до турбулентного режиму течії з хаотичними траєкторіями руху частинок рідини. Відбувається розширення конуса розпилення, що забезпечує покриття всієї робочої поверхні сенсора. В зоні контакту струменя з поверхнею виникають вихрові потоки, які сприяють ефективному змиванню забруднень без надмірного механічного впливу [35].

3. Діапазон діаметрів сопла понад 0,9 мм: Кут факела продовжує зростати, проте кінетична енергія крапель суттєво падає. Швидкість потоку стає недостатньою для швидкого руйнування стійкої біоплівки, що вимагає збільшення тривалості циклу промивання і, відповідно, витрати промивної рідини.

Результати моделювання показали, що для сопла діаметром 0,8 мм формується оптимальний конус розпилення, який повністю охоплює групу сенсорів, забезпечуючи рівномірний розподіл швидкостей по поверхні очищення [35].

На основі проведеного математичного моделювання обґрунтовано вибір конструктивних параметрів гідравлічної системи пристрою очищення:

- Оптимальний діаметр сопла форсунки становить **0,8 мм**. Це значення забезпечує баланс між площею покриття струменем та його миючою здатністю.
- Використання симетричного розташування двох форсунок у площині YZ дозволяє сформувати суцільну зону очищення, що перекриває всі датчики на каретці, мінімізуючи «мертві зони».
- Робочий тиск у системі, що забезпечується обраною помпою, є достатнім для створення турбулентного потоку, необхідного для якісного видалення біологічних забруднень.

Отримані результати лягли в основу інженерної методики розрахунку системи очищення та були використані при виготовленні експериментального зразка ПАК.

3.3. Алгоритмічне та апаратне забезпечення системи керування

Надійна та автономна робота пристрою для автоматичного контролю параметрів (ПАК) забезпечується спеціалізованою системою керування, побудованою на базі сучасних мікроконтролерних засобів та силової електроніки. Апаратна архітектура системи розроблена з урахуванням вимог до точності позиціонування механізмів, стабільності вимірювань малих електричних сигналів від датчиків та стійкості до впливу агресивного середовища біогазової установки.

HART-система (Highway Addressable Remote Transducer) – це гібридний промисловий протокол зв'язку, що поєднує традиційний аналоговий сигнал (4 -20 мА) з цифровим для передачі даних від «розумних» датчиків. Вона дозволяє одночасно вимірювати процес (аналог) і налаштовувати або діагностувати прилад (цифра) по одній парі дротів.

Апаратна реалізація системи керування. Структурну схему електронного блоку керування наведено на рис. 3.5. В якості центрального обчислювального ядра обрано 8-бітний мікроконтролер **AVR ATmega328P**. Вибір даного контролера обумовлений його високою надійністю, достатньою обчислювальною потужністю для реалізації логіки циклограми, наявністю необхідної периферії (UART, I2C, SPI) та стійкістю до електромагнітних завад, що є критичним в умовах роботи поруч із силовим електрообладнанням.

1. Привод вертикального переміщення каретки: Реалізовано на базі двигуна NEMA 17, який через механічну передачу забезпечує спуск та підйом блоку сенсорів. Керування двигуном здійснюється драйвером **A4988**, який дозволяє регулювати струм обмоток та реалізувати мікрокроковий режим роботи для підвищення плавності ходу та точності позиціонування.

2. Привод механізму герметизації (ковпачків): Для відкривання та закривання захисних ковпачків використано другий двигун NEMA 17, оснащений редуктором. Редуктор необхідний для збільшення моменту зусилля, що гарантує надійне притискання ковпачків до ущільнювачів та герметизацію датчиків у паркувальному положенні. Керування також здійснюється через драйвер A4988.

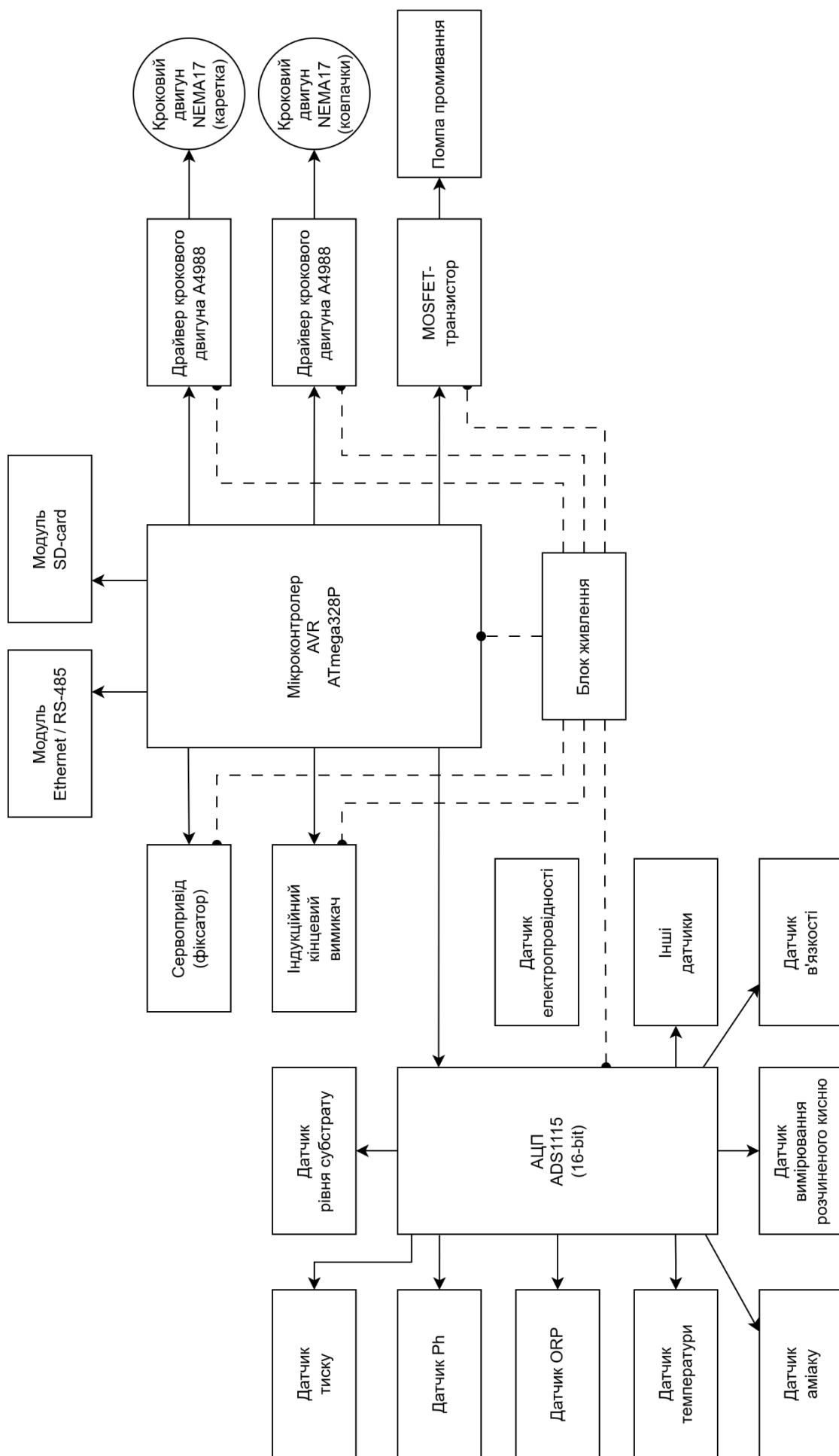


Рис. 3.5. Структурна схема системи керування ПАК

Джерело: розроблено автором.

3. Система фіксації положення: Для забезпечення енергоефективності та аварійної безпеки в кінематичну схему введено сервопривід. Його функція полягає у механічному блокуванні (фіксації) каретки та валу механізму ковпачків у заданих положеннях. Це дозволяє знімати напругу з обмоток крокових двигунів (вимикати режим утримання) під час пауз, що зменшує енергоспоживання та нагрів двигунів.

Вимірювальна підсистема Оскільки вихідні сигнали від електрохімічних датчиків (рН, ОВП) є низьковольтними та високоімпедансними, вбудований АЦП мікроконтролера не забезпечує необхідної точності та розрядності. Тому для оцифрування сигналів використано зовнішній 16-бітний аналого-цифровий перетворювач **ADS1115** з інтерфейсом I2C. Він має вбудований підсилювач із програмованим коефіцієнтом підсилення (PGA), що дозволяє з високою точністю вимірювати як малі різниці потенціалів, так і стандартні аналогові сигнали.

Підсистема комутації та датчиків положення/ Керування помпою системи гідроструминного очищення, яка живиться від джерела постійного струму 12 В, реалізовано за допомогою силового ключа на базі **MOSFET-транзистора**. Це забезпечує можливість широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для регулювання тиску подачі рідини, що було обґрунтовано в підрозділі 2.2.1.

Для контролю крайніх положень рухомих частин та ініціалізації системи використано **індукційні кінцеві вимикачі**. На відміну від механічних контактів, які швидко окислюються, та оптичних датчиків, які втрачають працездатність при забрудненні лінз бризками субстрату, індуктивні сенсори є герметичними та нечутливими до неметалевих забруднень, що робить їх ідеальним рішенням для агресивного середовища біореактора.

Алгоритмічне забезпечення. Логіка роботи пристрою реалізована у вигляді вбудованого програмного забезпечення мікроконтролера. Алгоритм керування (рис.3.6) побудований за модульним принципом і включає основний цикл вимірювання та підпрограми обробки аварійних ситуацій.

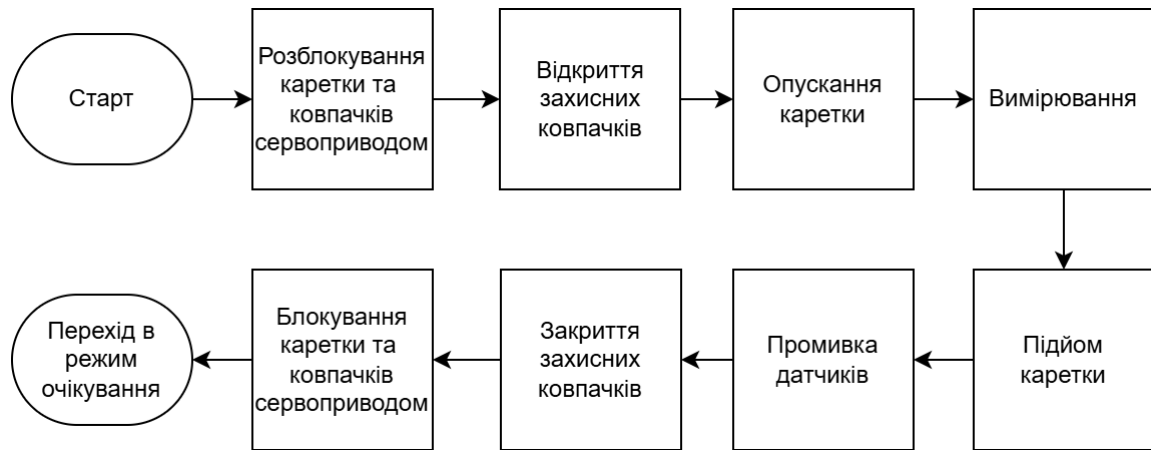


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритму роботи ПАК

Джерело: розроблено автором.

Типовий алгоритм вимірювання включає наступну послідовність операцій:

1. **Ініціалізація:** Перевірка стану системи, опитування кінцевих вимикачів.
2. **Підготовка:** Подача сигналу на сервопривід для розблокування механізмів.

Увімкнення драйвера A4988 приводу ковпачків та поворот шестерні для відкриття доступу до датчиків.

3. **Позиціонування:** Увімкнення драйвера приводу каретки, опускання сенсорів у робочу зону до спрацювання відповідного програмного лічильника кроків або датчика рівня.

4. **Вимірювання:** Затримка для стабілізації показів, зчитування даних через АЦП ADS1115, цифрова фільтрація шуму.

5. **Повернення та очищення:** Підйом каретки у верхнє положення. Увімкнення MOSFET-ключа помпи на заданий час для формування гідроструменя очищення.

6. **Паркування:** Поворот механізму ковпачків у положення «Закрито»

7. **Фіксація:** Активація сервоприводу для механічного блокування рухомих частин. Вимкнення струму утримання крокових двигунів для переходу в режим енергозбереження.

Обґрунтування режимів роботи електроприводів пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння наведено у Додатку

3.4. Обґрунтування режимів роботи електроприводів пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння

Надійна робота пристрою для автоматичного контролю (ПАК) в умовах агресивного середовища та тривалої автономної експлуатації вимагає ретельного обґрунтування вибору виконавчих механізмів. Кінематична схема пристрою, яка захищена патентом [38], передбачає наявність двох основних вузлів руху:

- вузол *вертикального переміщення* забезпечує спуск та підйом каретки з датчиками для занурення в субстрат та виведення в зону обслуговування;
- вузол *герметизації* забезпечує відкривання та закривання захисних ковпачків.

Специфіка роботи цих вузлів (необхідність точного позиціонування, робота на низьких швидкостях, утримання навантаження, робота в умовах підвищеної вологості, можливого забруднення та необхідності високої точності позиціонування) обумовлює доцільність використання крокових електродвигунів. У цьому підрозділі проведено теоретичне дослідження режимів їх роботи та розрахунок необхідних енергетичних характеристик для вибору оптимальних типорозмірів двигунів та драйверів керування.

Обґрунтування режимів роботи електроприводів пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння представлено у Додатку Л.

3.5. Дослідження характеристик модифікацій крокового електродвигуна в системі автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння

При застосуванні крокових електродвигунів найбільш важливими є такі силові параметри: пусковий момент (максимальний момент, при якому двигун може запуститися з місця без пропуску кроків), утримуючий момент (утримання положення під струмом), момент фіксації (утримання без живлення за рахунок магнітів) та динамічний крутний момент (обертання, що зменшується зі швидкістю). Утримуючий момент є найбільшим і забезпечує точність позиціонування. Момент фіксації існує, як правило, у гібридних двигунах.

Для досліджень пускових властивостей двигуна виготовлено макетний зразок пристрою, загальний вид і електрична схема якого показана на рис.3.7. Для вимірювання пускового моменту застосовано динамометр аналоговий пружинний універсальний NK-300, клас точності 0,5 %. Маса приладу становить 0,6 кг. Динамічна похибка під час вимірювання пускового моменту, а саме за швидкого руху або вібрації, інерція корпусу та внутрішніх механізмів (пружини, передавальний пристрій, стрілки) і природне демпфування може впливати на точність. Оскільки динамометр закріплений на обертовій платформі, його момент інерції визначається тільки внутрішнім механізмом. Тоді розрахунок можна вести приблизно за формулою для матеріальної точки

$$J_d = m \cdot r^2 \quad (3.5)$$

де m – маса внутрішнього механізму динамометра (в нашому випадку вона складає 0,38 кг), r – відстань від осі обертання до центру мас приладу.

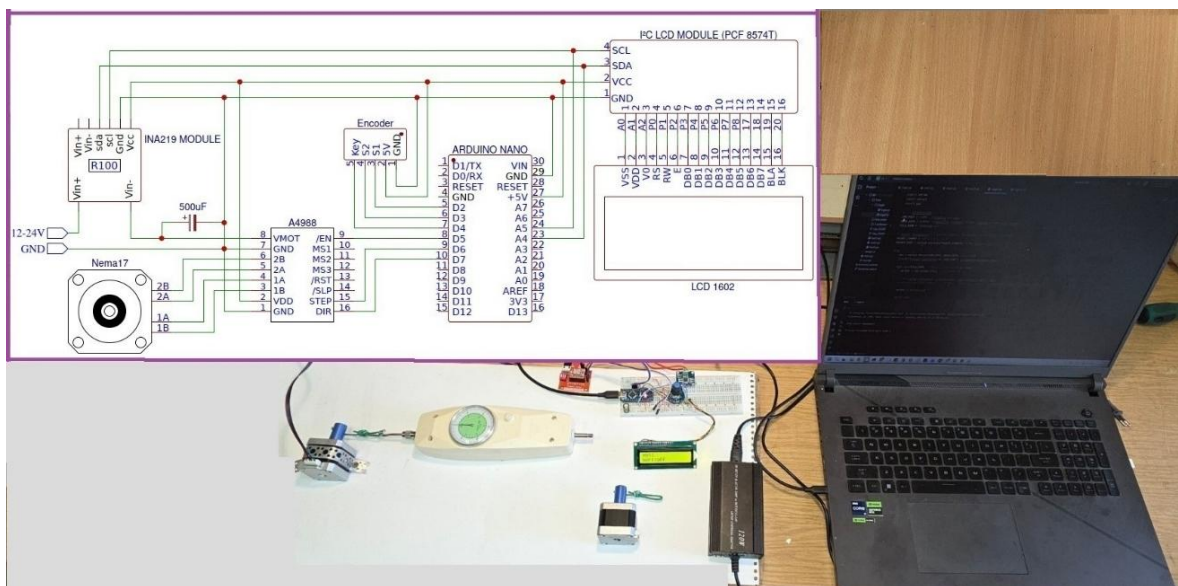


Рис.3.7. Загальний вид і електрична схема пристрою для вимірювання пускового моменту крокового двигуна

Джерело: розроблено автором.

Динамічні режими та плавність ходу. Особливістю крокових двигунів є ризик виникнення резонансних явищ та втрати кроків при різкому старті. Коли двигун

здійснює крок, ротор не відразу встановлюється в нову позицію, а здійснює затухаючі коливання. Систему «ротор – магнітне поле – статор» можна розглядати як пружинний маятник, частота коливань якого залежить від моменту інерції ротора з урахуванням навантаження та величини магнітного поля. В той же час характеристики самого двигуна теж впливають на частоту цих коливань:

$$f_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{N \cdot M_{\text{утр.}}}{J_r + J_n}}, \quad (3.6)$$

де f_0 - резонансна частота, N - число повних кроків на оберт, $M_{\text{утр.}}$ - момент утримання, J_r - момент інерції ротора, J_n - момент інерції навантаження.

Максимальні коливання двигуна спостерігаються, коли частота вхідних імпульсів відповідає власній частоті двигуна (близько 200 Гц). Якщо двигун запускати з частотою близько 1000 імпульсів на секунду, тобто вищій за резонансну, то при пуску таких явищ можна уникнути.

На рис.3.8 представлені результати вимірювання пускового моменту двигуна моделі 17HD40005-22В при напрузі живлення 12 В та використанні драйвера А4988.

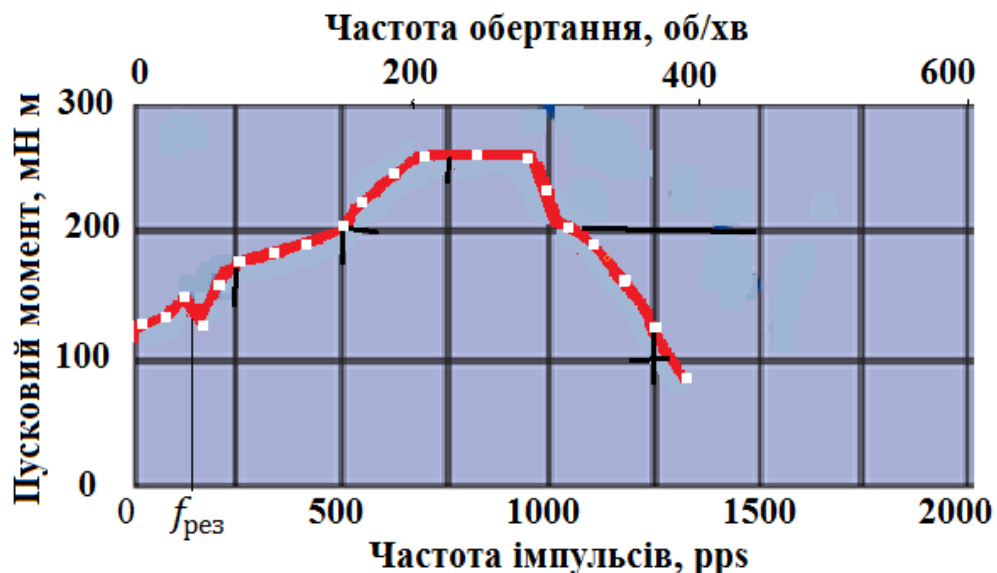


Рис.3.8. Пускова характеристика крокового двигуна моделі 17HD40005-22В

Джерело: розроблено автором.

Спостерігаються вібраційні процеси і провали характеристик в зоні резонансної частоти. Величина пускового моменту достатня для запуску двигуна і перевищує розрахований рівень навантаження (0,045 м). Один з методів боротьби з вібрацією крокового двигуна є використання мікрокрокового режиму, при якому керування струмами у фазах, які одночасно вмикаються, здійснюється невеликими кроками при певному співвідношенні фазних струмів, забезпечуючи розділення півкроку на ще менші мікрокроки. Для нівелювання означених ризиків та захисту чутливих елементів (скляних електродів) від вібрацій у системі керування на базі драйвера A4988 реалізовано:

- *Мікрокроковий режим*: поділ основного кроку ($1,8^\circ$) на 16 мікрокроків. Це суттєво зменшує амплітуду вібрацій, знижує акустичний шум та забезпечує високу плавність переміщення каретки.
- *Профіль розгону (Ramp-up)*: швидкість обертання двигуна наростає лінійно (трапецеїдальний профіль швидкості). Це дозволяє долати інерцію спокою без перевищення критичного моменту зриву (Pull-out torque). На рис.3.9 представлені характеристики залежності крутного моменту, частоти обертання від частоти імпульсів крокового двигуна 17HD6012N по результатам тестування при напругах 12 і 24 В.

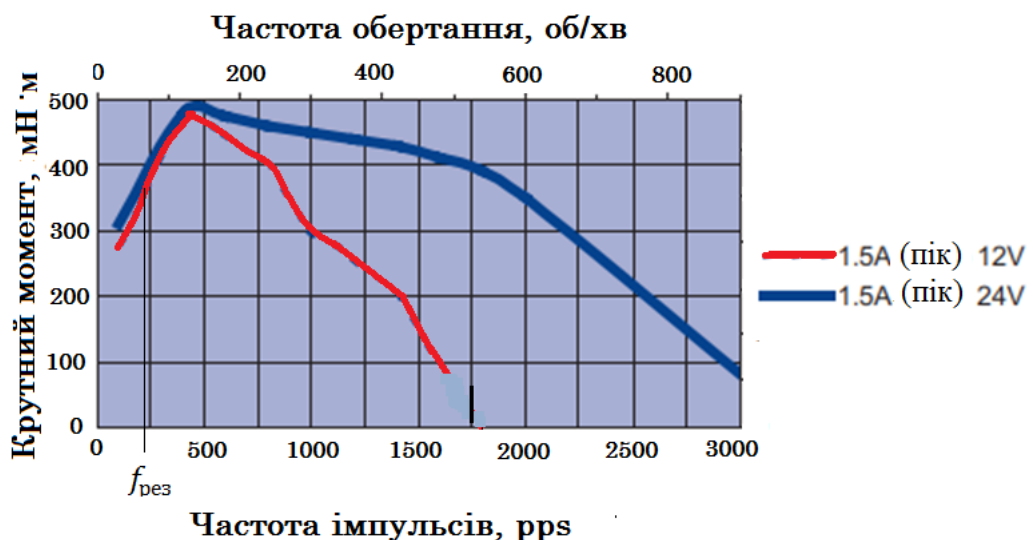


Рис. 3.9. Характеристика залежності крутного моменту від частоти імпульсів крокового двигуна

Джерело: розроблено автором

Алгоритм гібридної фіксації та енергоефективність. Головним недоліком пасової передачі є відсутність самогальмування, а крокового двигуна – споживання струму для фіксації ротора навіть у нерухомому стані. Для розв'язання цих проблем в умовах автономного живлення розроблено комбінований алгоритм керування:

1. **Активний режим (Рух та вимірювання)** - під час переміщення драйвер подає номінальний струм на обмотки. При короткочасних зупинках (під час вимірювання) фіксацію положення забезпечує двигун у режимі утримання (Holding Torque).

2. **Режим паркування (Механічна фіксація)** - після досягнення верхньої точки («Паркування») спрацьовує сервопривід-фіксатор (механічне гальмо), який фізично блокує каретку.

3. **Режим сну (Енергозбереження)** - одразу після підтвердження механічної фіксації драйвер A4988 отримує команду на вимкнення силових виходів. Це повністю знеструмлює двигун NEMA 17.

Висновки до розділу 3

1. Теоретично обґрунтовано, що комбінація двигуна NEMA 17, драйвера A4988 та системи механічного блокування забезпечує необхідні силові та динамічні характеристики для надійного функціонування ПАК.

2. Розроблено конструкцію та алгоритми роботи пристрою ПАК, що забезпечують автоматичне обслуговування сенсорів (очищення, калібрування) без розгерметизації біореактора.

3. За допомогою CFD-моделювання встановлено оптимальні гідродинамічні параметри системи очищення: використання сопел діаметром 0,8 мм при тиску 0,8–0,9 МПа забезпечує ефективне видалення біоплівки.

4. Проведено розрахунок та вибір електроприводів. Для переміщення каретки обрано кроковий двигун NEMA 17 з пасовою передачею, що забезпечує п'ятикратний запас по моменту та стійкість до забруднень.

5. Розроблено апаратне забезпечення системи керування на базі мікроконтролера ATmega328P, яке інтегрує керування приводами, збір даних від сенсорів та бездротову передачу інформації.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА

4.1. Програма та методика проведення комплексних експериментальних досліджень

Головною метою проведення експериментальних досліджень є фізична верифікація теоретичних положень, підтвердження адекватності розроблених математичних моделей електромагнітних, теплових та гідродинамічних процесів, а також оцінка реальної енергетичної ефективності та робочих характеристик розробленого електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора.

Об'єктом експериментального дослідження є фізичний макет електротехнічного комплексу, який включає заглибний ПЕМП, пристрій автоматичного контролю параметрів (ПАК) та розроблену систему керування і моніторингу (рис.4.1).

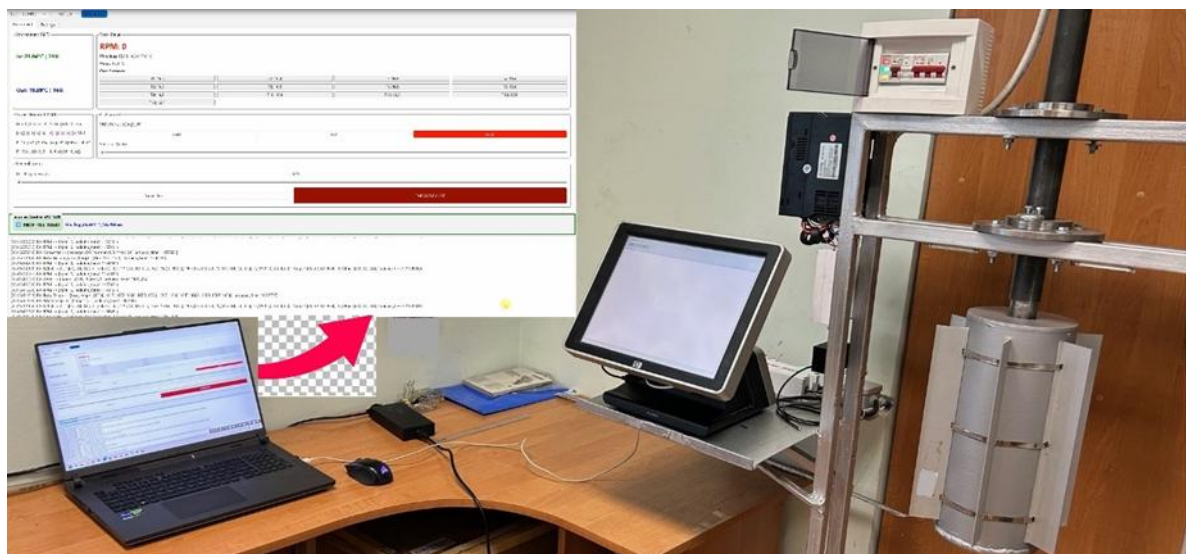


Рис.4.1. Експериментальний зразок електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора

Джерело: розроблено автором.

Для досягнення поставленої мети було розроблено комплексну програму експериментальних досліджень електротехнічного комплексу моніторингу та

регулювання режиму роботи біогазового реактора (Додаток Б). Принципова електрична схема розробленого електротехнічного комплексу представлена в Додатку В.

Фундаментальною особливістю запропонованої методики є те, що весь масив експериментальних даних збирався виключно за допомогою розробленого апаратно-програмного комплексу, описаного у розділах 2,3. Обробка отриманих масивів експериментальних даних здійснювалася методами математичної статистики та регресійного аналізу з використанням спеціально розробленого програмного забезпечення:

- програмне забезпечення електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора (Додаток Г);
- програма мікроконтролера на роторі ПЕМП (Додаток Д).

У Додатку Ж представлено методику та результати експериментальних досліджень системи очищення (характеристики помпи, картини гідродинамічних процесів при розпилюванні).

4.2. Експериментальні дослідження електромеханічного перетворювача з розширеними функціями моніторингу для біотехнологічних систем

Дослідження проводилися за спеціально розробленою програмою, яка включає оцінку топології зовнішнього магнітного поля, а також порівняльний аналіз трьох принципово різних режимів живлення (від автотрансформатора, перетворювача частоти та симісторного регулятора напруги) за допомогою розробленого апаратно-програмного комплексу моніторингу.

4.2.1. Дослідження магнітного поля на поверхні заторможеного ротора

Однією з ключових інноваційних функцій заглибного ПЕМП є його здатність здійснювати не лише тепловий та гідродинамічний, але й електромагнітний вплив на біогазовий субстрат. Як було показано у розділі 2, змінне низькочастотне магнітне поле, що проникає крізь масив ротора в технологічне середовище, здатне

інтенсифікувати метаболізм метаногенних архей, збільшуючи загальний вихід біогазу. Для підтвердження розрахункових значень індукції магнітного поля, отриманих у розділі 2 шляхом моделювання в Comsol Multiphysics, було проведено натурний експеримент із вимірювання просторового розподілу магнітної індукції на зовнішній поверхні ПФР (порожнистого феромагнітного ротора). Зважаючи на складність вимірювання параметрів магнітного поля в русі та в рідкому середовищі, дослідження проводилися на повітрі (без занурення у воду чи субстрат) у режимі загальмованого ротора ($s = 1$). Режим короткого замикання був обраний з таких науково-технічних міркувань:

- Усунення динамічних похибок: фізична зупинка ротора дозволяє уникнути флуктуацій вимірювань, викликаних обертанням, вібрацією та ексцентриситетом, що гарантує високу точність позиціювання вимірювального зонда.

- Максимальний електромагнітний вплив: у режимі $s=1$ частота перемагнічування ротора дорівнює частоті мережі живлення, що викликає максимальні вихрові струми в масиві ротора. Для проведення вимірювань на зовнішню циліндричну поверхню ПФР було попередньо нанесено координатну сітку (розмітку) із заданим кроком по вертикальній осі (осі Z). На рис. 4.2 показано розташування датчиків при вимірюванні магнітної індукції на поверхні ротора.

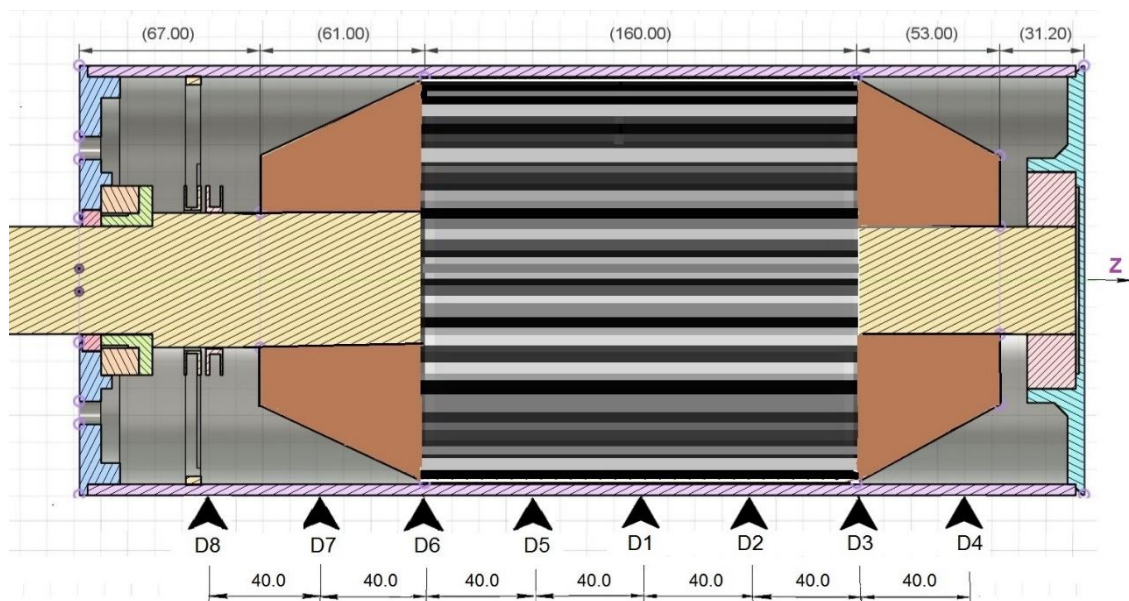


Рис. 4.2. Розташування датчика при вимірюванні магнітної індукції

Джерело: розроблено автором

Використовувались такі вимірювальні прилади: Tenmars TM-197 AC/DC Magnetic Field Meter, призначений для вимірювання магнітного поля низької частоти від 40 Гц до 500 Гц; тепловізор Xintest НТІ НТ-18, теплова чутливість 0,07 °С, діапазон температур: -20С-300°С, частота захоплення зображення 8 Гц, діапазон довжин хвиль 8-14 мкм. Електричні величини ПЕМП для режиму загальмованого ротора при живленні від автотрансформатора такі : фазна напруга 65 В; струм 19 А.

Вимірювальний зонд, оснащений датчиком Холла, послідовно переміщувався вздовж вертикальної твірної ротора від верхнього торцевого фланця до нижнього. Зонд орієнтувався таким чином, щоб фіксувати нормальну (радіальну) складову вектора магнітної індукції, яка безпосередньо проникає в субстрат. Дані фіксувалися дискретно у вузлах координатної сітки та заносилися до протоколу випробувань. Отриманий масив експериментальних даних дозволив побудувати картину аксіального розподілу магнітної індукції на поверхні ротора (рис.4.3).

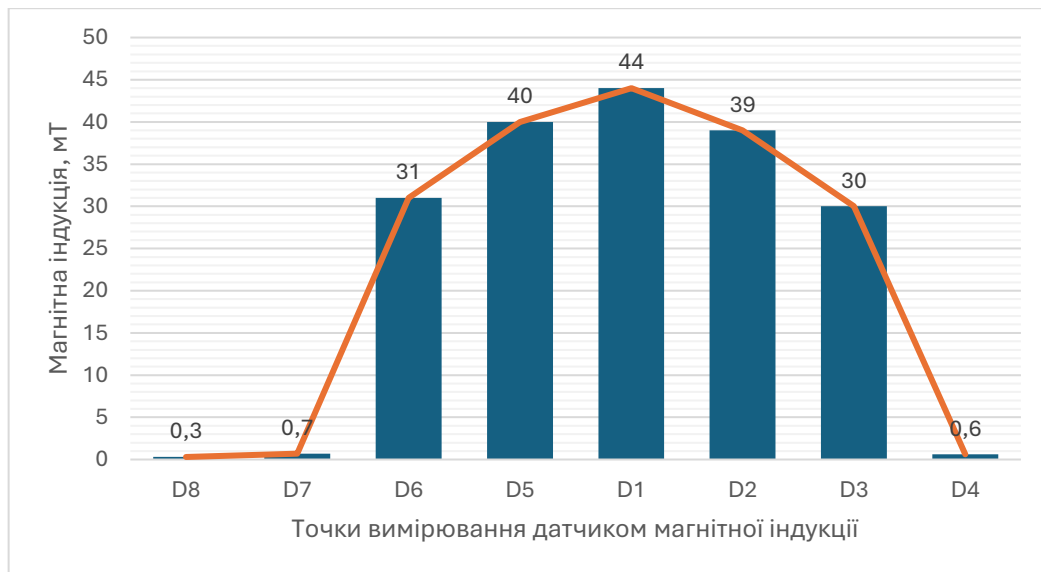


Рис. 4.3. Графік аксіального розподілу нормальної складової індукції магнітного поля на поверхні загальмованого ротора ПЕМП

Джерело: розроблено автором

Відповідність якісного розподілу нормальної складової індукції результуючого магнітного поля на поверхні ротора поля демонструє термограма, що знята на другій хвилині від моменту підключення живлення до ПЕМП, а тепловиділення від проходження вихрових струмів сформували температурне поле (рис.4.4).

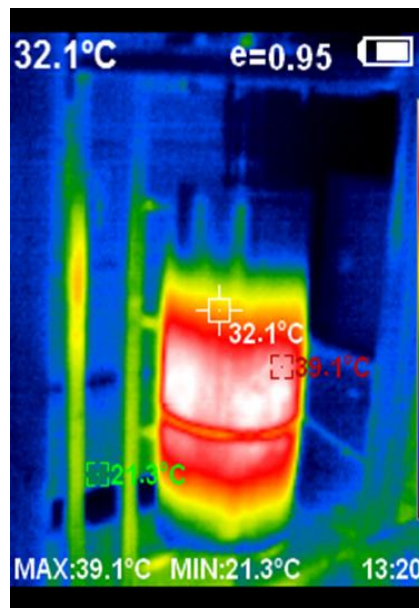


Рис. 4.4. Термограма поверхні ротора ПЕМП при загальмованому стані

Джерело: розроблено автором

Аналіз просторового розподілу магнітного поля дозволяє зробити такі висновки:

- Яскраво виражений крайовий ефект (End-effect): У центральній частині ротора (в межах активної довжини магнітопровода статора) спостерігається відносно рівномірне магнітне поле зі стабільною амплітудою. Проте наближаючись до торцевих частин ротора (верхнього та нижнього країв), величина магнітної індукції різко змінюється. Це пояснюється явищем розсіювання магнітного потоку в лобових частинах обмоток статора та викривленням силових ліній на краях феромагнітного масиву.

- Ефект екранування (Скін-ефект): Масивний феромагнітний ротор виконує роль електромагнітного екрана. Більша частина магнітного потоку статора замикається в товщі стінки ротора, індуючи там вихрові струми, що є джерелом тепловиділення. На зовнішню поверхню проникає лише залишкова частка магнітного поля. Величина індукції, зафіксована на поверхні ротора, підтверджує розрахункові дані з розділу 2 і становить 44 мТ (відхилення від результатів моделювання 12%). Враховуючи той факт, що при масштабуванні електротехнічного комплексу до більших потужностей і об'ємів біореакторів, напруга живлення ПЕМП буде зростати і відповідно будуть зростати рівні магнітної індукції на поверхні ротора. Таким чином, досягається

біологічно активний рівень для стимуляції мікроорганізмів, але абсолютно безпечний для навколишнього обладнання.

4.2.2. Дослідження режимів роботи ПЕМП при живленні від трифазного автотрансформатора

Першим етапом комплексних випробувань поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП) стало дослідження його характеристик при живленні від трифазного автотрансформатора. Цей режим розглядається як базовий (еталонний), оскільки автотрансформатор забезпечує подачу на статорні обмотки чистої синусоїдальної напруги промислової частоти (50 Гц) з можливістю плавного регулювання амплітуди без внесення вищих гармонік, характерних для напівпровідникових перетворювачів.

Метою даного експерименту була оцінка енергетичних, теплових та кінематичних показників машини з масивним феромагнітним ротором в умовах синусоїдального магнітного потоку та визначення ефективності такого режиму для цілей одночасного перемішування та нагрівання біогазового субстрату (імітатора – води об'ємом 150 л). Протягом усього експерименту напруга живлення підтримувалася на незмінному рівні, а зовнішнє механічне втручання в роботу системи було повністю виключене. Дані щодо частоти обертання ПФР (порожнього феромагнітного ротора) фіксувалися за допомогою датчика Холла. На рис.4.5 представлені зафіксовані залежності зміни температур частин ПЕМП і температури субстрату у біореакторі від часу роботи ПЕМП в режимі перемішування і нагрівання.

Ефективність ПЕМП як нагрівача визначається його здатністю трансформувати енергію електромагнітного поля у теплову (через вихрові струми в роторі) та передавати її в субстрат. Графік температури води (рис. 4.5) демонструє стабільне, але відносно повільне ступінчасте зростання від 6,9°C до 8,1°C за ≈ 15 хвилин роботи. Градієнт нагріву становить близько 0,08°C/хв. Такий низький темп нагрівання пояснюється тим, що при живленні суто синусоїдальною напругою 50 Гц глибина проникнення електромагнітної хвилі у феромагнітний масив ротора є мінімальною.

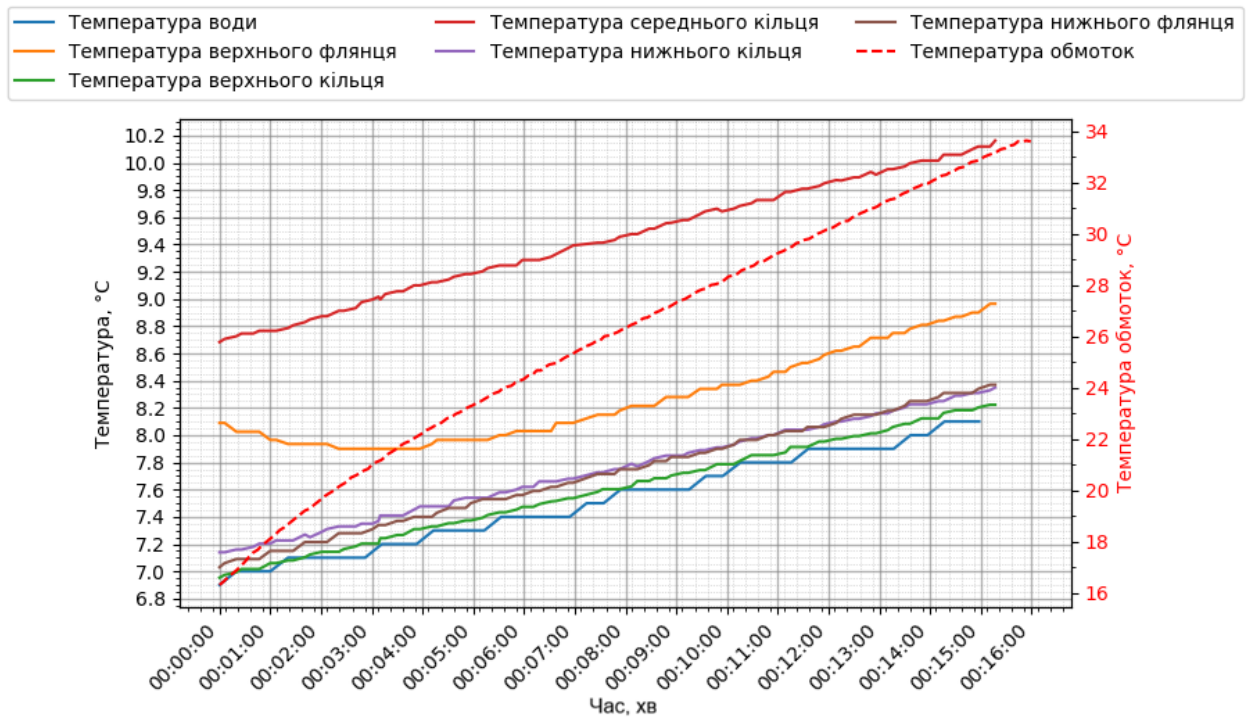


Рис.4.5. Динаміка зміни температур при живленні ПЕМП від автотрансформатора

Джерело: розроблено автором

Водночас, середня температура обмоток статора (рис. 4.5) зростає з 16°C до $\approx 34^{\circ}\text{C}$. Зважаючи на те, що в конструкції ПЕМП використано мідний емальпровід з класом ізоляції «Н» (допустима робоча температура до 180°C), такий температурний режим є абсолютно безпечним і свідчить про високу надійність роботи машини. Автотрансформаторне живлення забезпечує найбільш «м'який» тепловий режим для електричної ізоляції статора. Мікроклімат усередині ПЕМП (температура та вологість, зафіксовані датчиками АНТ10) залишався стабільним, без досягнення точки роси.

Як видно з отриманого графіка (рис. 4.6), частота обертання не є абсолютно сталою величиною, а демонструє тенденцію до плавного нелінійного зростання: від початкових $\approx 99,5$ об/хв на старті до ≈ 102 об/хв на 15-й хвилині експерименту.



Рис. 4.6. Динаміка частоти обертання ротора ПЕМП при живленні від автотрансформатора

Джерело: розроблено автором

Зростання частоти обертання пояснюється збільшенням електромагнітного моменту машини за рахунок збільшення активного опору масиву ротора та зменшення динамічної в'язкості робочої рідини внаслідок нагрівання. Цей факт підтверджує високу чутливість розробленого електромеханічного комплексу до реологічних змін у технологічному середовищі.

Дані, отримані з вимірювальних модулів PZEM-004T, дозволили детально проаналізувати енергетичний баланс ПЕМП у сталому режимі. На графіку (рис. 4.7) зафіксовано, що при встановленій фазній напрузі $U_f \approx 36,7\text{В}$, середній фазний струм I_ϕ становив близько 13,6 А. При цьому розподіл потужностей мав яскраво виражену асиметрію (рис. 4.7): повна потужність $S \approx 1500\text{ВА}$; реактивна потужність $Q \approx 1300\text{ВАр}$; активна потужність $P \approx 700\text{Вт}$. Коефіцієнт потужності ($\cos \phi$) протягом усього експерименту залишався на рівні 0,46-0,47. Таке низьке значення $\cos \phi$ є закономірним та фундаментально обумовленим конструкцією машини. Наявність суцільного масивного феромагнітного ротора та значного еквівалентного повітряного зазору призводить до того, що для створення необхідного магнітного потоку потрібен великий струм намагнічування (який формує реактивну потужність). Розрахунковий електромагнітний момент при цьому стабілізувався на рівні 3,2-3,3 Н*м, що повністю забезпечує гідродинамічні потреби перемішування 150 літрів рідини.

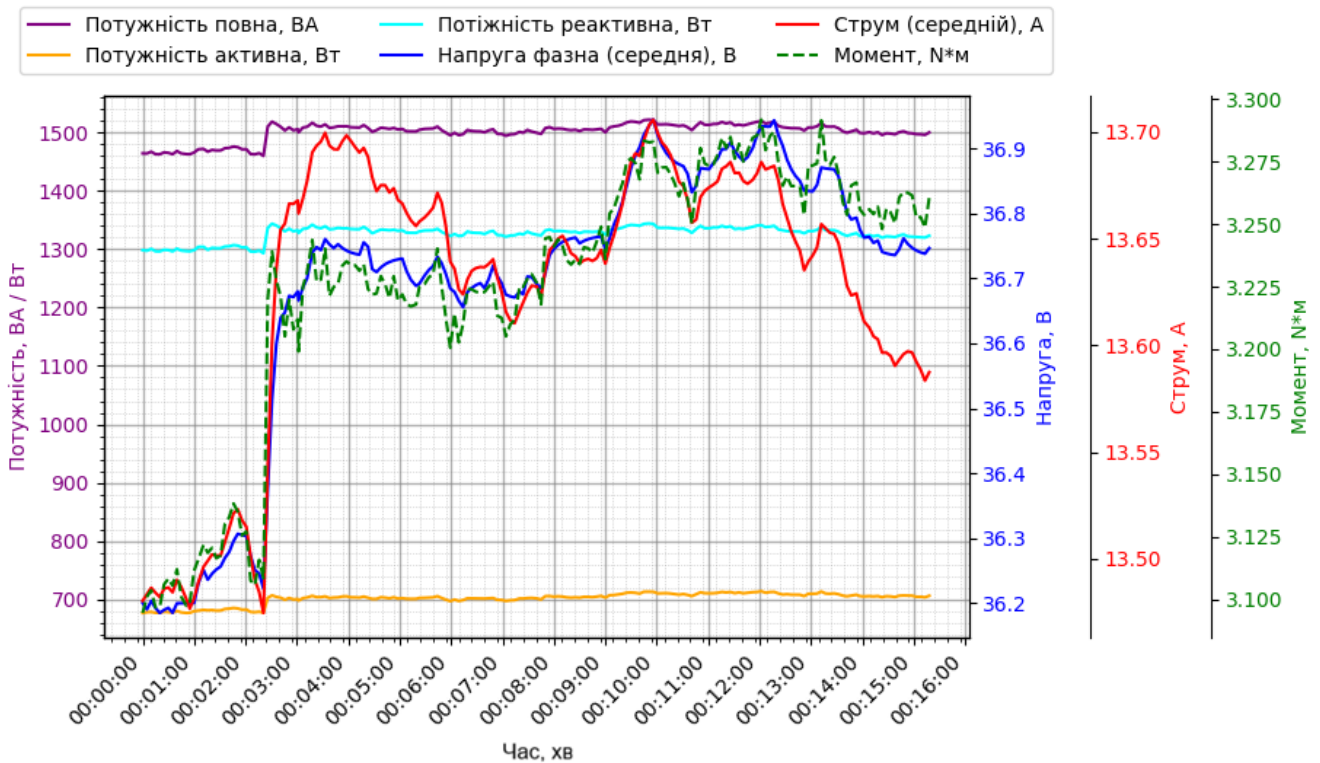


Рис. 4.7. Динаміка зміни електричних величин і енергетичних параметрів ПЕМП
Джерело: розроблено автором

Експериментальні дослідження довели, що живлення ПЕМП від трифазного автотрансформатора забезпечує виключно плавний та безпечний режим роботи (відсутність вібрацій, відсутність перегріву ізоляції класу «Н»). Механічна потужність достатня для якісного перемішування субстрату. Проте, інтенсивність індукції вихрових струмів у масиві ротора є відносно низькою. Внаслідок цього ПЕМП у даному режимі має порівняно низьку ефективність саме як нагрівач технологічного середовища, що вимагає дослідження інших методів живлення для інтенсифікації тепловиділення.

4.2.3. Дослідження режимів роботи ПЕМП при живленні від частотного перетворювача

Другим етапом комплексних випробувань стало дослідження роботи заглибного ПЕМП при живленні від промислового перетворювача частоти (векторного інвертора

серії SUSWE SU-600 потужністю 5,5 кВт). Застосування частотного регулювання є стандартним рішенням для сучасних електроприводів, тому оцінка його впливу на ПЕМП має вагомим практичне значення для біогазових технологій. Експеримент проводився з використанням закону скалярного керування ($U/f = \text{const}$), метою якого було дослідження поведінки ПЕМП на знижених частотах для забезпечення повільного (технологічного) перемішування субстрату з одночасною оцінкою ефективності тепловиділення.

Особливістю роботи електричних машин із масивним феромагнітним ротором на низьких частотах є екстремальне зростання струму статора. Як свідчать експериментальні дані (рис. 4.8), під час випробувань фазна напруга формувалася інвертором на рівні близько 16-18,5 В (права вісь ординат).

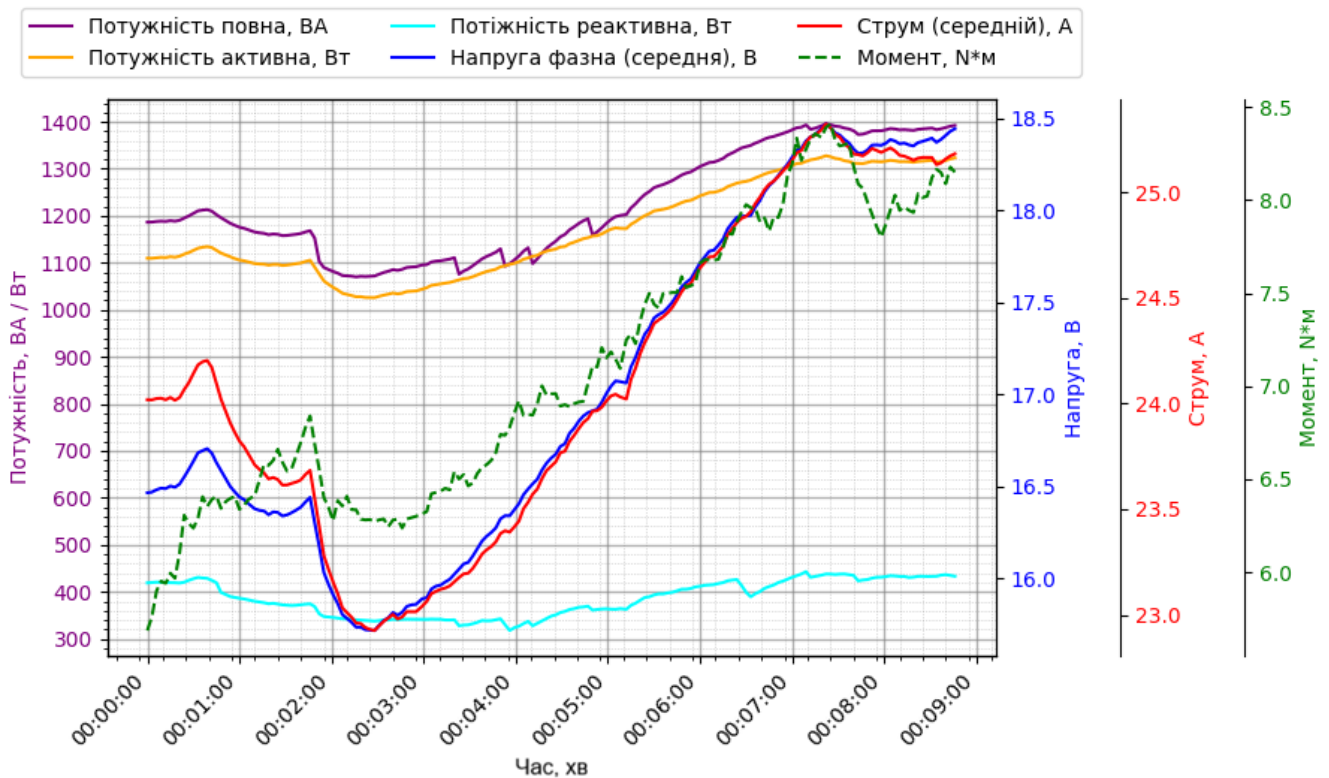


Рис. 4.8. Динаміка зміни електричних величин і енергетичних параметрів при живленні ПЕМП від частотного перетворювача

Джерело: розроблено автором

При такій низькій напрузі середнє значення фазного струму сягало 22,7-25,3 А. Такий режим виявився граничним для обраного частотного перетворювача (SUSWE SU-600 5,5 кВт), оскільки робочі струми впиралися в апаратний ліміт захисту

інвертора від перевантаження. Внаслідок цього вивести ПЕМП на номінальну розрахункову частоту обертання не вдалося: вихідна частота перетворювача була апаратно обмежена на рівні 6,8-6,9 Гц. Обмеження потужності інвертора безпосередньо вплинуло на кінематичний режим роботи ПЕМП. На наведеній зведеній (зшитій) кривій частоти обертання (рис. 4.9) спостерігається провал показників: зниження з 68 до 62 об/хв з подальшим відновленням до 71 об/хв.

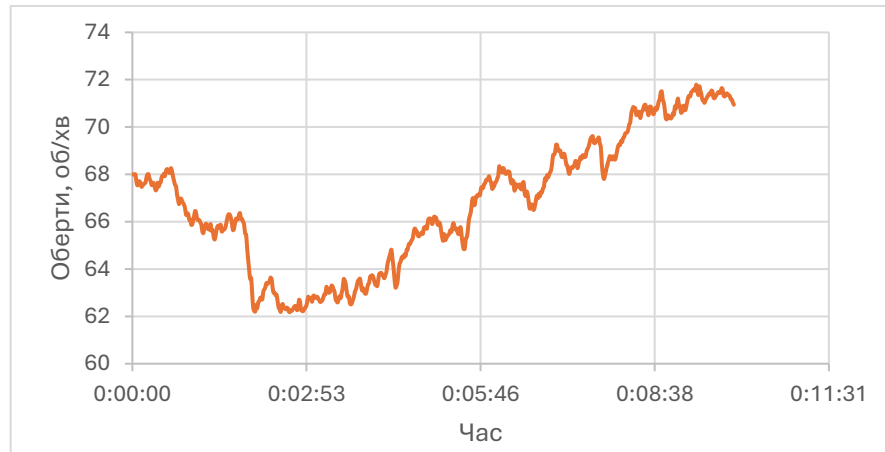


Рис. 4.9. Динаміка частоти обертання ротора ПЕМП при живленні від частотного перетворювача

Джерело: розроблено автором

Аналіз оригінального (необрізаного) графіка (рис.4.10) дозволяє однозначно пояснити цей феномен.

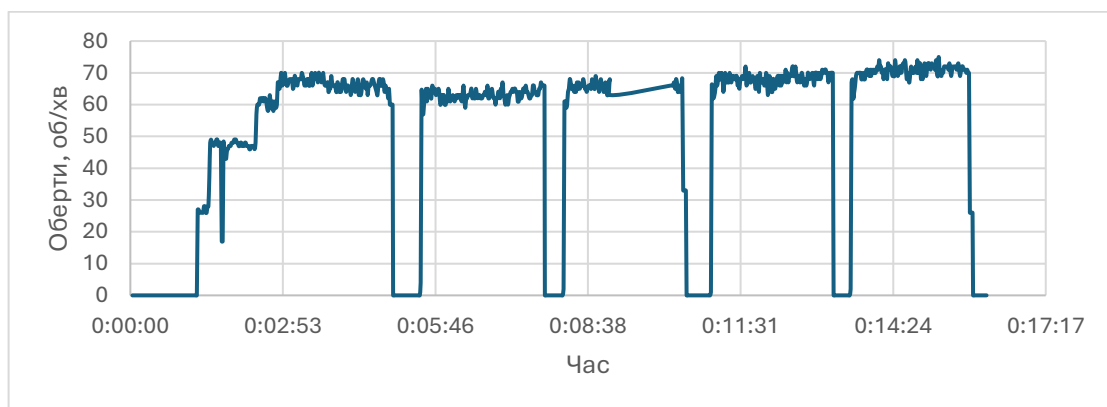


Рис. 4.10. Необроблена (оригінальна) осцилограма частоти обертання ПЕМП під час роботи з частотним перетворювачем із фіксацією аварійних вимкнень

Джерело: розроблено автором

Цей провал є наслідком періодичних аварійних зупинок інвертора. Через перевищення допустимого струму перетворювач частоти періодично блокував вихідні

ключі, інерційний ротор починав гальмувати у в'язкому середовищі води, а після автоматичного перезапуску інвертора знову розганявся. Зшивання цих розрізнених фрагментів активної роботи і призвело до появи артефакту у вигляді локального провалу частоти обертання на фінальних графіках.

Найбільш показовим результатом даного експерименту стала оцінка ПЕМП як генератора теплової енергії при живленні струмами низької частоти. Згідно з теорією електромагнітного поля, тепла потужність P_T , що виділяється у масивному феромагнітному роторі за рахунок індукції вихрових струмів, є прямо пропорційною квадрату частоти переманічування та квадрату магнітної індукції:

$$P_T \propto f_2^2 \times B^2$$

де f_2 – частота струмів у роторі.

Експериментальні дані повністю підтверджують цю теоретичну залежність. Графік температури води у резервуарі (рис. 4.11) є абсолютно лінійним – за 12 хвилин активної роботи температура не змінилася жодним чином і залишилася на рівні $10,2^\circ\text{C}$.

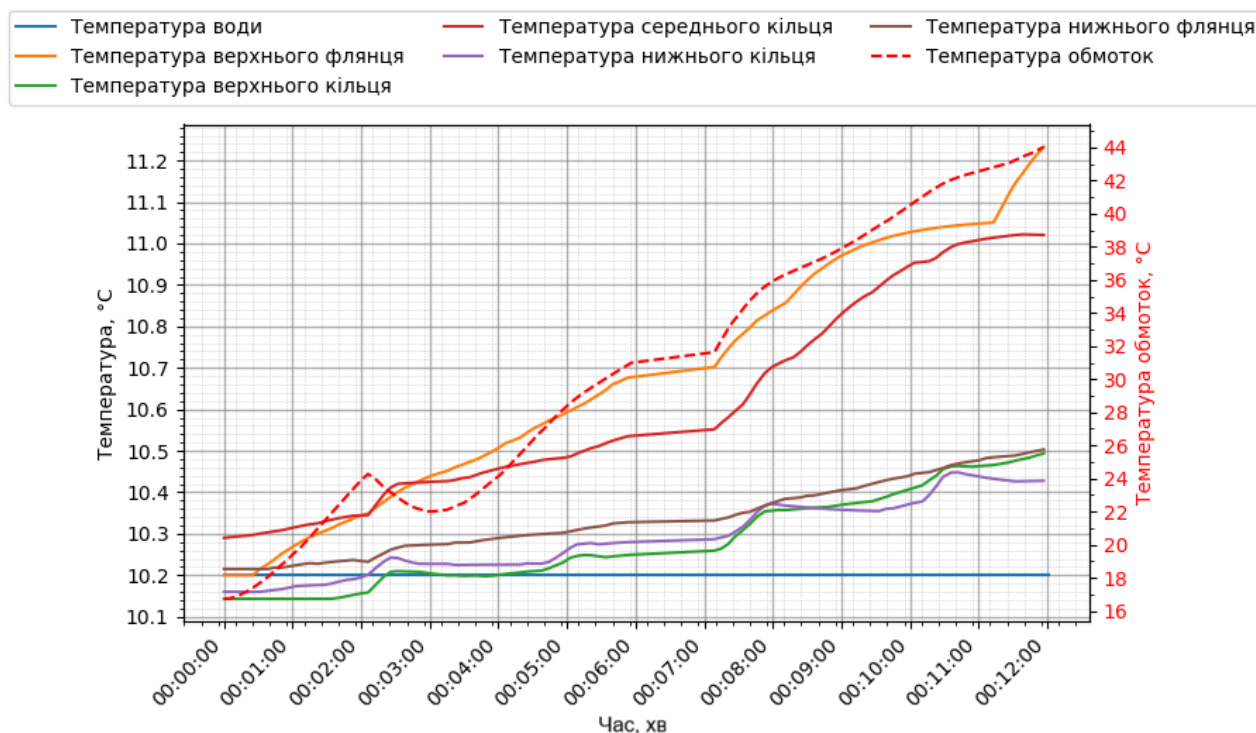


Рис. 4.11. Динаміка зміни температур при живленні ПЕМП від частотного перетворювача

Джерело: розроблено автором

Оскільки інвертор працював на частоті 6,8-6,9 Гц, інтенсивність індукції вихрових струмів у масиві ротора впала практично до нуля, відповідно, тепловіддача від ротора у технологічне середовище була відсутня.

Натомість, середня температура обмоток статора (рис. 4.11) за той самий час стрімко зростає з 17°C до 44°C. Цей процес пояснюється виключно джоулевими втратами ($P_{Cu} = I^2R$) у міді обмоток статора. Через величезні струми (22-25 А) вся електрична енергія, що надходила від інвертора, витрачалася на паразитні втрати у статорі, не виконуючи корисної роботи з нагрівання субстрату.

Аналіз енергетичних показників (рис. 4.8) підтверджує попередні висновки. Споживана активна потужність P становила близько 1300-1400 Вт, проте вона витрачалася переважно на нагрів міді статора. Незважаючи на низьку ефективність нагріву, ПЕМП генерував значний електромагнітний момент (6-7 Н*м), що дозволяло впевнено долати гідродинамічний опір 150 літрів води навіть при низьких обертах. Повна потужність S при цьому сягала 3000-3500 ВА, що ще раз доводить високий рівень реактивної енергії в системі з масивним ротором.

Проведені експериментальні дослідження дозволяють зробити категоричний висновок: використання класичного частотного перетворювача (у режимі скалярного керування на низьких частотах) є абсолютно недоцільним для цілей нагрівання біогазового реактора за допомогою ПЕМП. Тому застосування ПЧ в апаратно-програмному комплексі ПЕМП може бути виправданим виключно у так званому «літньому режимі» (або для теплолюбних штамів, які не потребують додаткового екзогенного підігріву), коли від заглибного агрегату вимагається лише виконання функції повільного (делікатного) перемішування біомаси для підтримання її гомогенності та вивільнення бульбашок біогазу.

4.2.4. Дослідження режимів роботи ПЕМП при живленні від симісторного регулятора напруги

Третім, завершальним етапом дослідження ПЕМП стало випробування його роботи при живленні від симісторного регулятора напруги. Цей метод керування

базується на фазовому регулюванні: силові ключі (симістори) відсікають частину періоду синусоїдальної напруги мережі, що дозволяє плавно регулювати діюче значення напруги на обмотках статора. Проте головним наслідком такого регулювання є суттєве спотворення форми кривої напруги.

Метою даного експерименту було підтвердження гіпотези про те, що несинусоїдальна напруга здатна кардинально інтенсифікувати процеси тепловиділення у масивному феромагнітному роторі ПЕМП за рахунок генерування вищих просторово-часових гармонік.

Під час експерименту за допомогою цифрового осцилографа було зафіксовано форму фазної напруги безпосередньо на клеммах статора ПЕМП (між фазою L1 та нейтраллю N). Як свідчить отримана осцилограма (рис. 4.12), форма напруги кардинально відрізняється від синусоїдальної. Зафіксовано яскраво виражені жорсткі фронти («зрізи»), гострі піки перенапруг (максимальне амплітудне значення досягало 185 В) та високий вміст вищих гармонічних складових. Діюче значення (RMS) фазної напруги при цьому становило 79 В.

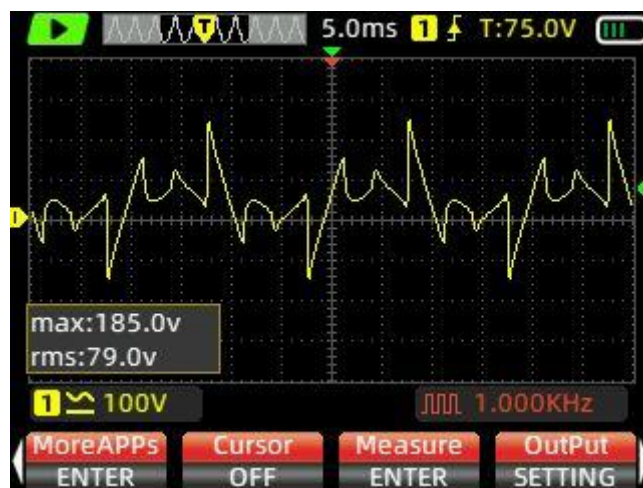


Рис. 4.12. Осцилограма фазної напруги на статорі ПЕМП при живленні від симісторного регулятора

Джерело: розроблено автором

За даними вимірювального комплексу (рис. 4.13), у сталому режимі середнє значення зведеної фазної напруги підтримувалося на рівні близько 58-60 В, а середній фазний струм становив 17-18 А. Оцінка енергетичного балансу показала найвищу

ефективність цього режиму серед усіх досліджених. Як видно рис. 4.16, споживання активної потужності (P) становило близько 1400-1500 Вт, а розрахунковий електромагнітний момент – близько 6,5-7 Н*м.

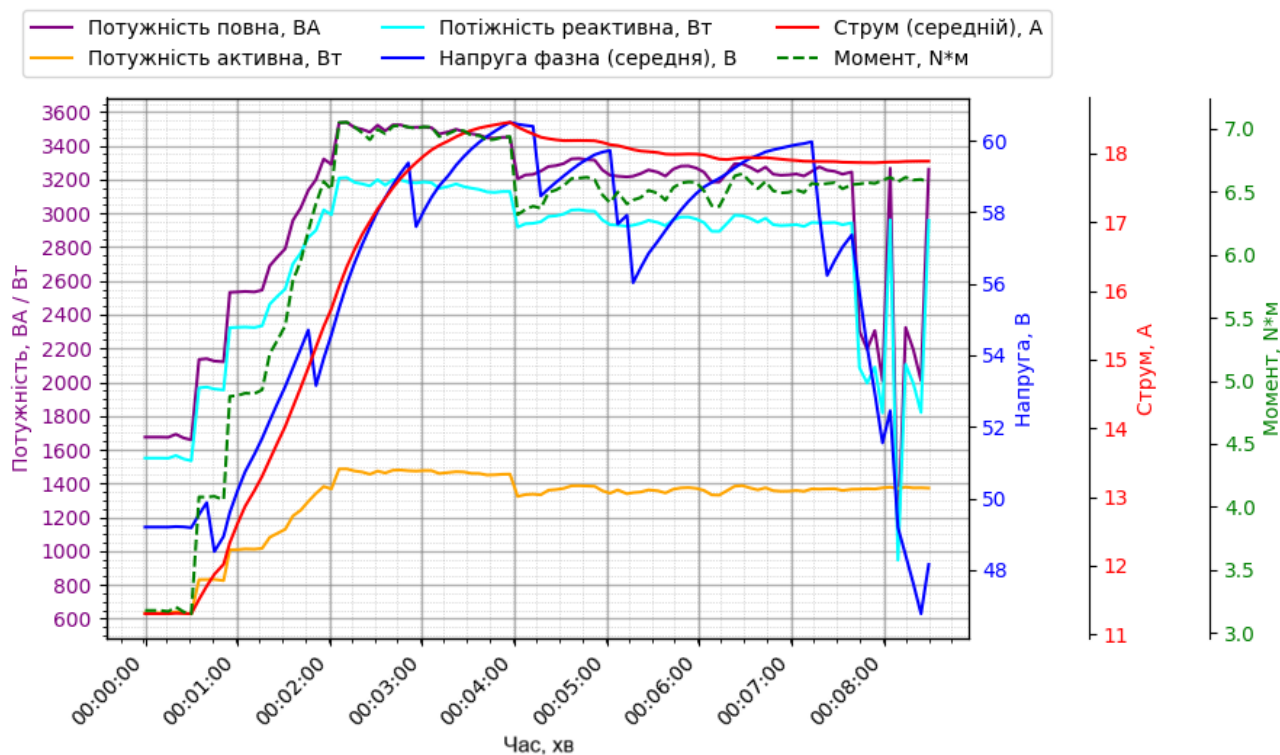


Рис. 4.13. Динаміка зміни електричних величин і енергетичних параметрів при живленні ПЕМП від симісторного регулятора

Джерело: розроблено автором

Це означає, що застосування симісторного регулятора дозволило отримати з ПЕМП майже вдвічі більше активної (теплової та механічної) потужності порівняно з режимом автотрансформатора (де активна потужність становила лише 700 Вт). Найбільш показовим індикатором ефективності є динаміка температури технологічного середовища (води). Графік температури води (рис. 4.14) демонструє стрімке зростання: від 14,9°C до 15,9°C лише за 11 хвилин роботи. Цей результат переконливо доводить, що «зрізана» форма напруги з жорсткими фронтами формує широкий спектр вищих гармонік, які не гасяться повітряним зазором, а глибоко проникають у масив ротора. Ці гармоніки ідеально індукують потужні вихрові струми, що забезпечує високоефективний нагрів води безпосередньо від поверхні

ротора. Температура обмоток статора (рис. 4.14) при цьому зросла від 16°C до 42°C, що є абсолютно безпечним робочим режимом для ізоляції класу «Н».

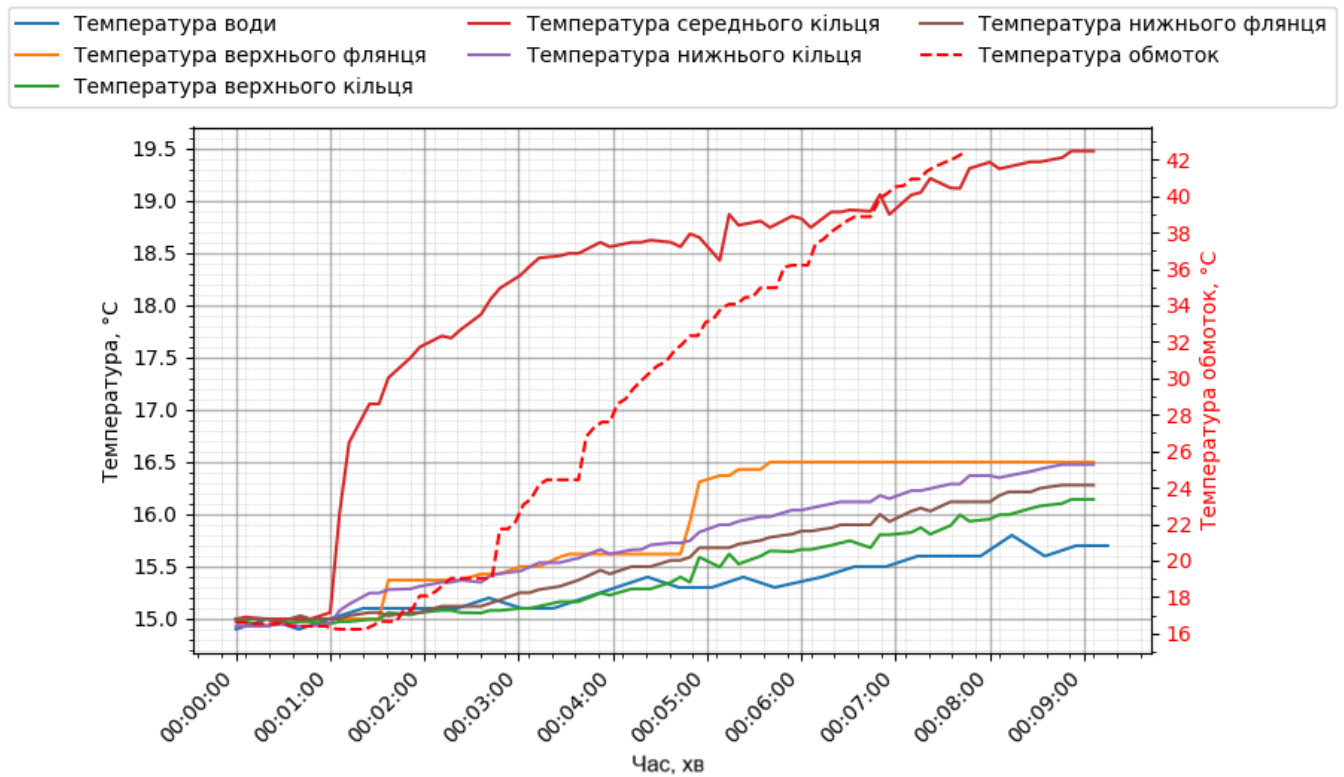


Рис. 4.14. Динаміка зміни температур при живленні ПЕМП від симісторного регулятора

Джерело: розроблено автором

Частота обертання ротора (рис. 4.15) на початку експерименту становила 50 об/хв, після чого спостерігалось її цілеспрямоване плавне зростання до рівня понад 90 об/хв (стабілізація відбулася на позначці близько 92...93 об/хв). Така динаміка зумовлена методикою проведення цього етапу випробувань: для виведення ПЕМП на номінальну швидкість перемішування (~100 об/хв) в умовах високого гідродинамічного опору рідини, оператор поступово збільшував вихідну напругу (змінював кут відкриття симістора). Це дозволило уникнути екстремальних пускових струмів та плавно вивести агрегат на робочий режим.

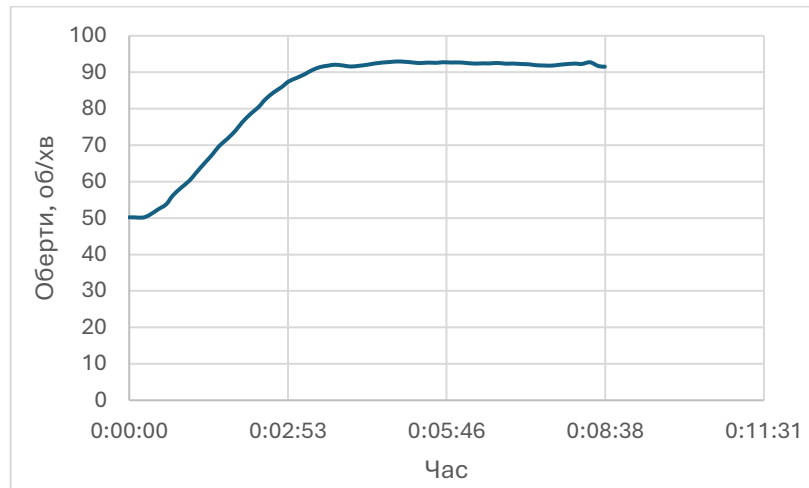


Рис. 4.15. Динаміка частоти обертання ротора ПЕМП при живленні від симісторного регулятора

Джерело: розроблено автором

Особливістю роботи ПЕМП при симісторному регулюванні стала наявність механічної вібрації агрегату. Ця вібрація є прямим наслідком несинусоїдальності живильної напруги: вищі гармоніки магнітного потоку створюють пульсації електромагнітного моменту. Однак такий вібраційний режим не є критичним недоліком. По-перше, при промисловому масштабуванні ПЕМП (збільшенні маси та моменту інерції ротора) ці пульсації будуть ефективно демпфуватися, і рівень вібрації значно знизиться. По-друге, у контексті біогазових технологій генерація низькочастотних мікровібрацій має позитивний ефект: вона сприяє додатковій механічній дезінтеграції флокул субстрату та полегшує відрив бульбашок синтезованого біометану від біомаси, запобігаючи утворенню плаваючої кірки.

Таким чином, симісторний регулятор напруги рекомендується як базовий виконавчий орган системи керування ПЕМП у технологічних режимах, що вимагають максимальної теплової віддачі (наприклад, при виведенні біореактора на термофільний режим бродіння або під час компенсації тепловтрат у холодну пору року).

4.3. Експериментальні дослідження обертового трансформатора у складі поліфункціонального електромеханічного перетворювача

Система безконтактної передачі енергії (СБПЕ) на базі обертового трансформатора, яка докладно описана у розділі 2, була успішно випробувана в лабораторних умовах на стенді. Однак для остаточного підтвердження її працездатності та надійності необхідно було дослідити роботу трансформатора у робочих умовах – безпосередньо вбудованим у конструкцію працюючого ПЕМП.

Особливістю такої експлуатації є одночасна дія двох потужних дестабілізуючих факторів: електромагнітний вплив полів розсіяння від головних обмоток статора, що працюють у жорстких несинусоїдальних режимах (наприклад, від симісторного регулятора); тепловий вплив як статора, так і масивного ротора.

Метою даного етапу досліджень була оцінка стабільності передачі телеметричних даних та надійності живлення роторного мікроконтролера в умовах інтенсивного промислового електромагнітного шуму та теплових навантажень.

Експериментально встановлено, що живлення ПЕМП струмами високої амплітуди (особливо при симісторному регулюванні з жорсткими фронтами напруги) створює щільний спектр електромагнітних завад (ЕМЗ). У ході випробувань було зафіксовано, що ці поля розсіяння не перешкоджають передачі енергії через обертовий трансформатор (живлення роторного вузла залишалось стабільним), проте вони здійснюють відчутний вплив на лінію передачі даних 1-Wire, до якої підключені 13 датчиків температури DS18B20.

В умовах роботи ПЕМП періодично фіксувалися випадки тимчасової втрати зв'язку з окремими датчиками або генерація недійсних значень температури. Зокрема, у потоці телеметрії спостерігалася поява специфічного значення $327,67^{\circ}\text{C}$. Поява цього показника не є випадковою похибкою, а є програмно детермінованою «міткою помилки», інтегрованою в алгоритм роботи мікроконтролера. Значення $327,67$ відповідає максимальному позитивному числу для 16-бітного знакового цілого типу даних (`int16_t`), який використовується для передачі результатів вимірювання. Оскільки фізична межа вимірювання датчиків DS18B20 становить $+125^{\circ}\text{C}$,

використання значення 327,67 дозволяє системі моніторингу однозначно ідентифікувати стан «NULL» - відсутність відповіді від сенсора або отримання некоректного пакету даних по шині 1-Wire. Така архітектура обробки виняткових ситуацій дозволяє легко відфільтровувати недостовірні дані на рівні ведучого-контролера, не плутаючи їх із реальними тепловими сплесками. Фрагмент таблиці «сирих» (необроблених) даних телеметрії (табл.4.1) із середнього кільця ротора (Т4, Т5, Т6) демонструє виникнення маркерного значення 327,67 в умовах ЕМЗ

Таблиця 4.1

Фрагмент таблиці «сирих» (необроблених) даних телеметрії із середнього кільця ротора (Т4, Т5, Т6) умовах ЕМЗ

Час	Т4	Т5	Т6
14,91	15	14,93	15,06
21,2	15,06	14,93	15,06
35,23	15	14,93	15,06
41,52	15	14,93	15,06
55,57	15	14,93	15,06
61,99	15	14,93	15,06
75,06	15,06	15	15,12
81,05	16	15,93	16,12
87,04	16,75	16,5	327,67
100,02	17,18	16,87	17,12
105,87	17,36	17,01	17,24

Для мінімізації впливу цих збоїв на загальну точність вимірювань, в апаратно-програмному комплексі було імплементовано кілька рівнів захисту та алгоритмів обробки даних, працездатність яких була повністю підтверджена під час експерименту. Важливо підкреслити ієрархічну структуру системи: ведучий-контролер (ATmega328PB) не є автономним центром прийняття рішень щодо зміни технологічних параметрів. Він виконує роль виконавчого інтерфейсу («рук та ніг») керуючого комп'ютера стенда. Ведучий-контролер не здійснює самостійного зведення або інтелектуальної обробки вимірів – його завданням є безперервна трансляція всього масиву отриманих значень безпосередньо на ПК, де і відбувається основний аналіз та керування.

У ході досліджень було *верифіковано наступні рівні забезпечення надійності*:

- Програмна фільтрація на боці керуючого ПК: отримавши від ведучого-контролера пакет даних, що містить маркерне значення 327,67, алгоритм керування на ПК автоматично ідентифікує його як помилкове. Оскільки зміна температури у 150-літровій ємності та масивному роторі характеризується значною тепловою інерцією, алгоритм на ПК ігнорує такі артефакти, застосовуючи метод апроксимації на основі попередніх валідних значень (Hold-Last-Value). Це дозволяє підтримувати безперервність графіка вимірювань навіть при короткочасних електромагнітних завадах на шині 1-Wire веденого-вузла.

- Апаратна надлишковість та статистична обробка: система просторового розміщення датчиків забезпечує надлишковість даних, які ведучий-контролер передає на комп'ютер. Наприклад, для середнього кільця ротора (датчики Т4, Т5, Т6) алгоритм на ПК вираховує середнє значення. Аналіз експериментальних даних (табл. 4.4.1) підтверджує, що навіть за умови тимчасової появи маркера 327,67 на одному чи двох датчиках через ЕМЗ, керуючий алгоритм на ПК зберігає контроль над ситуацією, спираючись на дані працездатних сенсорів цієї ж зони.

- Автономна система аварійного захисту: хоча ведучий-контролер не може самостійно змінювати робочі параметри ПЕМП (частоту, напругу чи цикли очищення), у його мікропрограму закладено функцію критичного захисту. Це єдина сфера автономної дії контролера: у разі виявлення критичної ситуації (наприклад, вихід параметрів за аварійні межі або втрата зв'язку з головним алгоритмом), ведучий-контролер здатний миттєво знеструмити установку, запобігаючи пошкодженню обладнання. Будь-які ж планові коригування режимів роботи вносяться виключно оператором або автоматизованим алгоритмом керування на ПК.

Другим критичним фактором була оцінка роботи обертового трансформатора при зміні температурних умов. Під час роботи ПЕМП від симісторного регулятора (підрозділ 4.3.4) температура ротора та обмоток статора сягала 42°C. Результати експерименту засвідчили, що підвищення температури жодним чином не вплинуло на стабільність роботи системи безконтактної передачі енергії. Ведучий-контролер

стабільно забезпечував ведений-вузол енергією, необхідною для роботи радіомодуля JDY-40 та ініціалізації датчиків.

Експериментальні дослідження повністю підтвердили життєздатність розробленої архітектури. Ведучий-контролер успішно виконує функцію швидкісного шлюзу між об'єктом та керуючим ПК, забезпечуючи передачу сирих даних для подальшого аналізу. Використання програмних маркерів помилок типу 327,67 у поєднанні з інтелектуальною обробкою на боці ПК та автономним аварійним захистом на рівні заліза гарантує високу надійність комплексу в умовах інтенсивних електромагнітних та теплових навантажень.

4.4. Дослідження узгодженості роботи системи автоматичного очищення сенсорів та електромеханічного перетворювача

Ефективне функціонування електротехнічного комплексу біогазової установки вимагає не лише надійної роботи окремих вузлів (ПЕМП як активатора середовища та ПАК як вимірювального модуля), але й їхньої суворої просторово-часової узгодженості. Оскільки обидва агрегати розміщуються в єдиному робочому об'ємі біореактора, їхня одночасна робота без алгоритмічного узгодження неминуче призвела б до спотворення результатів вимірювань та фізичного руйнування вимірювального обладнання.

Метою даного етапу досліджень було розроблення та обґрунтування безпечного алгоритму взаємодії підсистем на основі аналізу фізико-хімічних принципів вимірювання та гідродинамічної обстановки в реакторі.

Під час активної роботи ПЕМП у біореакторі формуються потужні турбулентні потоки. Біогазовий субстрат не є гомогенною рідиною; він містить значну кількість нерозчинених твердих включень (залишків біомаси, волокон), а також він насичений бульбашками синтезованого біогазу (метану та вуглекислого газу). З іншого боку, пристрій автоматичного контролю (ПАК) оснащений високоточними, але вкрай чутливими до механічних впливів сенсорами. Найбільш вразливим елементом є електрод для вимірювання водневого показника (рН-метр), чутлива зона якого являє

собою тонку скляну мембрану (капсулу). Спроба занурення вимірювальної каретки ПАК у субстрат під час роботи ПЕМП є технічно неприпустимою з двох фундаментальних причин:

- Механічна безпека: удар масивного твердого фрагмента нерозчиненого субстрату, що рухається з високою швидкістю в турбулентному потоці від ротора ПЕМП, гарантовано призведе до розбиття скляної колби рН-метра та пошкодження інших датчиків (антивандальне виконання для таких прецизійних сенсорів не передбачено конструкцією).

- Метрологічна достовірність: фізико-хімічні принципи роботи іоноселективних електродів (зокрема рН) вимагають стабільного контакту з рідиною. Наявність швидкісних потоків, мікрокавітації та постійне потрапляння пухирців газу в чутливу зону датчика викликать значні шуми вимірювального сигналу, що зробить неможливим отримання достовірного значення.

Виходячи з наведених обмежень, для керування комплексом було розроблено жорсткий алгоритм послідовної взаємодії, побудований на принципі повного розділення фаз «активного впливу» та «вимірювання», програму програмного забезпечення якого наведено у Додатку Г.

Пристрій вимірювання параметрів функціонує як повністю автономний (автоматизований) вузол під керуванням центрального алгоритму ПК. Це рішення є критично важливим для унеможливлення помилок оператора. У системі апаратно та програмно заблокована можливість ручного опускання каретки при ввімкненому ПЕМП. Оператор має доступ лише до високорівневих команд. Наприклад, оператор може ініціювати «Позачергове вимірювання» або активувати режим «Повторного промивання» (якщо аналіз трендів показав, що попереднє автоматичне очищення не повністю зняло біоплівку і значення рН "зависло"). Однак навіть ці ручні команди виконуються ПК виключно через безпечний алгоритм з обов'язковою перевіркою стану головного привода ПЕМП.

4.5. Оцінка надійності та точності системи дистанційного моніторингу параметрів

Достовірність результатів будь-якого експериментального дослідження, а також стабільність роботи біогазової установки у промислових умовах, фундаментально залежать від метрологічної точності та апаратної надійності засобів вимірювання. Враховуючи, що розроблений електротехнічний комплекс працює в агресивному середовищі (висока вологість, вібрації, електромагнітні завади від силових перетворювачів), критично важливою була комплексна оцінка стійкості його вимірювальних підсистем.

Для моніторингу електричних параметрів статора ПЕМП (напруги, струму, активної потужності та коефіцієнта потужності) застосовувалися інтегровані модулі PZEM-004T (рис.4.16). Для підтвердження їхньої метрологічної адекватності на етапі пусконаладжувальних робіт проводилося паралельне (контрольне) зняття показів за допомогою еталонних лабораторних мультиметрів.

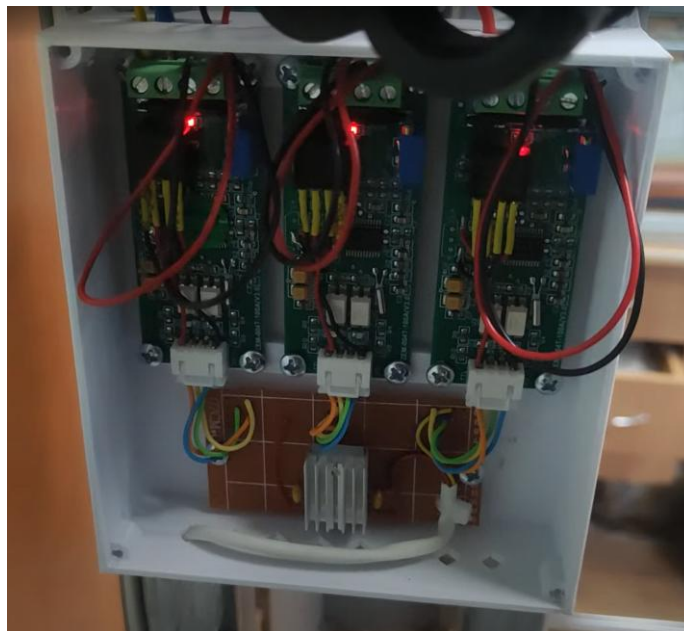


Рис. 4.16. Вигляд плат PZEM-004T в вимірювальному боксі

Джерело: розроблено автором.

Результати порівняння засвідчили, що розбіжність між даними системи телеметрії та еталонними приладами не перевищує 1-2%. Така похибка повністю

відповідає заявленим паспортним характеристикам вимірювальних модулів і є абсолютно прийнятною для оцінки енергетичного балансу електромеханічного комплексу. Використання гальванічної розв'язки через вбудовані трансформатори струму додатково забезпечило відсутність наведень на слабострумові кола мікроконтролера. Основою системи побудови 3D-теплової карти є масив цифрових датчиків DS18B20. Згідно з технічною документацією, їхня абсолютна похибка вимірювання у робочому діапазоні становить $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Одним із найголовніших досягнень розробленої системи стала забезпечення надійної бездротової передачі даних зсередини металевого ротора назовні. Як зазначалося раніше, початкове використання модулів на 433 МГц супроводжувалося масовою втратою пакетів через гармоніки перетворювачів. Перехід на трансивери JDY-40 (діапазон 2.4 ГГц) кардинально змінив ситуацію.

Під час проведення експериментів із симісторним регулятором (найбільш «шумний» в електромагнітному плані режим) візуальної втрати пакетів або затримок оновлення даних не спостерігалось. Ця стабільність є не лише заслугою високої частоти радіоканалу, але й результатом роботи розробленого інтелектуального алгоритму опитування. Згідно з цим алгоритмом, ведучий-контролер не знімає живлення з обертового трансформатора доти, доки не отримає валідний пакет даних (із підтвердженою контрольною сумою CRC-8). Навіть якщо в ефірі відбувалася втрата або пошкодження окремого пакета, система миттєво ініціювала повторну передачу. Оскільки швидкодія мікроконтролерів є високою, ці затримки не перевищували 1-2 секунди, що робило їх абсолютно непомітними для оператора та не впливало на якість отриманих графіків.

Комплексна оцінка підтвердила, що розроблена система моніторингу володіє високим рівнем метрологічної точності, алгоритмічної стійкості до електромагнітних завад та механічної надійності. Вона повністю відповідає вимогам до обладнання, призначеного для експлуатації в складних умовах біогазових технологій, і здатна гарантувати достовірність збору наукових та технологічних даних.

4.6. Аналіз енергетичної та економічної ефективності та перспективи впровадження електротехнічного комплексу

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволив визначити найбільш перспективні ніші для впровадження розробленого комплексу. Технологія орієнтована переважно на середні та великі промислові біогазові реактори (агропромислові комплекси, фермерські господарства закритого циклу, комунальні очисні споруди).

Однією з основних ознак біогазової технології є високі капітальні витрати, рівень яких визначається розмірами установки, потужністю, необхідністю застосування теплоізоляції, ступенем її автоматизації і досить високою вартістю спеціального устаткування. Крім цього відомо, що значна частина отриманого біогазу (іноді до 70%) витрачається на перемішування та підтримання температури в біореакторі. Як вже підкреслювалось, існуючі способи підвищення продуктивності вимагають великих витрат теплової і електричної енергії та майже вичерпали себе, нагальною задачею, яка потребує вирішення, є використання можливостей інтенсифікації процесу виробництва біогазу іншими засобами і методами, зокрема, електрофізичним впливом на мікроорганізми, що беруть в участь в процесах метаногенеза.

4.6.1. Аналіз досягнутих ефектів впливу магнітного поля на процеси метаногенезу

В результаті аналізу (розд.1) досліджень, проведених іноземними та вітчизняним вченими над широкими групами мікроорганізмів при використанні різних магнітних збурень, виявлено залежність біологічних ефектів в групах бактерій від характеру та інтенсивності впливу: вплив полів на мікроорганізми; підвищення швидкості хімічної реакції; розчинності солей і кислот; ступені електролітичної дисоціації; зміна окислювально-відновного потенціалу. В табл.4.2 представлені зведені експериментальні дані досягнутих ефектів впливу магнітного поля.

Таблиця 4.2

Зведені експериментальні дані досягнутих ефектів впливу магнітного поля на продуктивність біореактора

Параметри магнітного поля/ Параметри режиму	Властивості субстрату/найменування мікроорганізму	Вплив на продуктивність біореактора (біологічний/ фізико-хімічний ефекти)	Енергетичний ефект		
			Вхідна енергія (Вт·год)	Збільшення енергії внаслідок дії магнітного поля (Вт·год)	Приріст енергії розпаду (Вт·год/г TS)
1	2	3	4	5	6
Дослід - постійне магнітне поле. Магнітна індукція 15 мТл. Термофільний і мезофільний режими 2 дослід - електромагнітне поле з частотою 50 Гц. Термофільний і мезофільний режими Магнітна індукція 15 мТл. Тривалість ферментації 15 діб.	Субстрат з відходів життєдіяльності великої рогатої худоби, розбавлений до вологості 95 - 97%. Вміст сухої речовини не вказано. Об'єм реактору - 3 дм ³ .	При дії як постійного, так і змінного МП вихід біогазу на 12 - 14% перевищує контрольний показник без застосування МП як для термофільного режиму, так і мезофільного режиму [17].		Не визначається	
Комбіноване МП: низькочастотне електромагнітне поле промислової частоти з магнітною індукцією 4 мТл та постійне МП - 5 мТл, Мезофільний режим (t=38-40°C). Тривалість ферментації 21 діб.	Міні-біореактори об'ємом по 200 мл, які заповнені посівним матеріалом з працюючого біореактора, додано 25 г свинячого гною разом з підстилкою з лігноцелюлозної сировини (пшеничної соломи)	Кумулятивна питома швидкість виходу CH ₄ з одиниці маси дослідної суміші в реакторі за увесь період спостережень для біореакторів з впливом комбінованого магнітного поля склала 2,11 нл/кг/добу; для біореакторів без впливу - 0,92 нл/кг/добу. Швидкість вироблення CH ₄ зросла майже в 1,8 разів. Середня концентрація CH ₄ в біогазі зростає на 10%. [54, 70]	Витрати енергії на створення МП: $W_{зм} = (U \cdot I \cos \varphi) \cdot 24 = (29 \times 0,5 \cdot 0,6) \cdot 24 = 0,4$ Вт год $W_{пост} = (U \cdot I) \cdot 24 = 12 \cdot 0,6 = 0,3$ Вт год $\Sigma W = 0,7$ Вт год	(2,11 - 0,92) x 10 ³ Вт год/м ³ = 11,9 Вт год	11.2: 25=0,45 Вт·год/г TS
Відстань між магнітним полем та реактором становила 50 мм Магнітний порошок бг рівномірно змішували з ферментаційним матеріалом. Індукція магнітного поля становила 10-50 мТл Мезофільний режим 35 °С. Тривалість ферментації 21 діб	Об'єм реактору 1500 мл. Використанням оленячого гною 80 г як ферментаційного матеріалу та грибних залишків 35 г як інокуляту.	Середній приріст виробництва метану та вміст метану в суміші газів збільшувалися на 8 % [48] Використання МП і і наночастинок збільшує на 13,5% загальне виробництво біогазу, скорочується тривалість анаеробного розкладання [50]		Не визначається	

1	2	3	4	5	6
<p>Статичне магнітне поле Керамічні магніти з двох частин утворюють кільце. Пристрій встановлений на гумовій трубі, яка служила для перекачування вмісту реакторів. Інтенси́вність індукованого МП – 0,6 Тл [51]. Мезофільний режим 35 °С. Тривалість ферментації 20 діб.</p> <p>Статичне магнітне поле Мезофільний режим 35 °С. Тривалість ферментації 20 діб [52].</p>	<p>Анаеробне розкладання біомаси водоростей. Анаеробні реактори з активним об'ємом 4,0 дм³.</p> <p>Анаеробне розкладання стічних вод молочних заводів. Складні реактори об'ємом 1л. Початкова концентрація TS у реакторах становила близько 23,0 ± 1,5 г/л.</p> <p>Анаеробні реактори періодичної дії, заповнених живильним середовищем (0,5 л), вільний простір (0,6 л) реакторів був заповнений N2 (99,9%). Реактори були засіяні гранульованим мулом (100 г/л), які живилися глюкозою (2 г/л)</p>	<p>Найвищий вихід біогазу в діапазоні від 448,9 л/кг легких твердих речовин (ЛТР) до 456,6 л/кг ЛТР спостерігався у варіантах, у яких час утримання в зоні впливу МП коливався від 144 до 216 хв/добу. За цих умов концентрація метану в біогазі становила майже 65,0% [51].</p> <p>Вплив поверхневого магнітного поля на реактор призвів до вищого виробництва біогазу (на 20%) та вищого вмісту метану, ніж у контрольному реакторі. Деякі види бактерій та архей були стимульовані поверхневим магнітним полем [52].</p>	<p>Не визначався</p> <p>Не визначався</p>	<p>Не визначався</p>	<p>Не визначався</p>
<p>Статичне магнітне поле У кожному експерименті реактори працювали з постійним електромагнітним полем 5, 7,5 та 10 мТл... Електромагнітне поле генерувалося котушкою, виготовленою з мідного дроту діаметром 1,1 мм з 1,5 кг міді. Реагент знаходився всередині котушки. Використовувався блок живлення постійного струму. Мезофільний режим 37 °С. Тривалість ферментації 150 год. [118]</p>	<p>Результати показали збільшення виробництва метану на 21,5% у порівнянні з контрольними зразками (без впливу МП) у випробуваннях з електромагнітним полем 7,5 мТл [118]</p>	<p>Випробування проводилися для напруженості електромагнітного поля 5, 7,5 та 10 мТл. Обраний діапазон магнітного поля мав бути одним з найнижчих, знайдених у літературі, для кращого застосування в реальних масштабах, оскільки застосування магнітного поля може вимагати витрат електричної енергії.</p>			

Примітка. Енергетична цінність метану 10,0 кВт·год/м³

Для розрахунків енергетичного ефекту біостимуляції субстрату магнітним полем необхідно порівнювати вхідну енергію, що витрачається на створення магнітного поля, зі збільшенням енергії отриманого біометану внаслідок дії магнітного поля. Отримана різниця у розрахунку на масу сухої речовини дає приріст енергії розпаду, яка власне і визначає енергетичний ефект. Нажаль, подібні розрахунки не були здійснені практично у всіх відомих дослідженнях. В даній роботі здійснено такий розрахунок (див.табл.4.1) на основі даних енергетичних витрат проведення експерименту з комбінованим магнітним полем [70]. В подальшому проведено розрахунок для біореакторі об'ємом $V=10$ м³.

Існує кілька запропонованих механізмів, які можуть пояснити, як постійне МП впливає на мікробні спільноти в біореакторах. МП може посилювати метаболічну активність, стимулюючи взаємодію між іонами металів та внутрішньоклітинними ферментами (Zhang et al., 2015), шляхом електродинамічної взаємодії між магнітною силою та електричними струмами в живих організмах, а також впливаючи на клітинні мембрани та транспортні системи (Hu et al., 2020). Крім того, вплив МП змінює властивості води внаслідок змін молекулярної структури рідин, поляризації та розташування частинок, і, нарешті, змін електричного потенціалу молекул (Krzemieniewski et al., 2003).

Як вже відмічалось у розділі 2, на статори ПЕМП, або до нагрівального кабелю, що вмонтований у лопаті мішалки біогазового реактора [110] можливим є підведення як змінної напруги, так і постійної напруги. В останньому випадку на поверхнях ротора, або лопотей обертових частин буде створюватись постійне магнітне поле, інтенсивність якого може регулюватись в необхідних межах.

У разі промислової реалізації багатофункціональний електромеханічний перетворювач з зовнішнім масивним порожнистим ротором, що активізує процеси анаеробного бродіння, електромагнітними модулями може створювати магнітні поля з частотою від 0 ... 100 Гц і величиною індукції до 65 мТ. Магнітне поле формується в області контакту ротора з біомасою, яка одночасно перемішується і нагрівається. Відмінною рисою ПЕМП з точки зору енергетичного аспекту є те, що магнітне поле в ньому і на поверхні ротора – природня компонента, яка використовується перш за

все для створення електромагнітного обертового моменту та збудження вихрових струмів, які разом з усіма іншими втратами ПЕМП формують тепловий вплив на субстрат. Отже, загальний ККД ПЕМП у цьому випадку досягає майже 99%.

4.6.2. Аналіз енергетичної ефективності та синергетичного ефекту розробленого електротехнічного комплексу

Техніко-економічне обґрунтування здійснено для модельного об'єкта - пілотного біореактора об'ємом $V = 10 \text{ м}^3$ (коефіцієнт заповнення $q = 0,7$) з щоденним завантаженням приблизно 7 т гною за оптимальної вологості 92%. Для метанового бродіння прийнята робоча температура 38°C мезофільного режиму.

Теплове навантаження біореактора з безперервним режимом збродження визначається на основі рівнянь теплового балансу для різних періодів роботи споруди. Необхідна тепла енергія для періоду початкового нагріву біомаси до температури обраного режиму становить [120]:

$$W_{\text{н}} = Q_1 + Q_2 \quad (4.1)$$

Баланс теплової енергії для періоду безперервного режиму збродження біомаси описується рівнянням:

$$W_{\text{зб}} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (4.2)$$

де Q_1 - кількість теплоти, необхідна для нагрівання повного об'єму завантаженої біомаси, Дж; Q_2 - втрати теплоти через огороджувальні поверхні біореактора, Дж; Q_3 - втрати теплоти, пов'язані з виділенням біогазу (складають близько 1% від енергії підтримання режиму), Дж; Q_4 - кількість теплоти для нагрівання добової дози біомаси, Дж; Q_5 - втрати теплоти з видаленим збродженим субстратом.

Втрати енергії від біореактора в навколишнє середовище (Q_2) визначаються за формулою:

$$Q_2 = 0,0036 \cdot k \cdot S_{\text{М}} \cdot (t_{\text{бр}} - t_{\text{д}}) \cdot \tau \quad (4.3)$$

де $S_{\text{М}}$ - площа зовнішньої поверхні метантенка, м^2 ; $t_{\text{бр}}$ - температура бродіння, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{д}}$ - температура довкілля, $^\circ\text{C}$; τ - число годин на добу. Коефіцієнт теплопередачі

k ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$) знаходять з урахуванням термічного опору тепловіддачі на зовнішній поверхні R_3 та термічного опору теплопровідності ізоляційного шару $R_{\text{ТШ}}$:

$$k = \frac{1}{R_3 + R_{\text{ТШ}}} \quad (4.4)$$

При цьому термічний опір тепловіддачі визначається через коефіцієнт теплообміну на зовнішній поверхні α_3 , який залежить від швидкості вітру v_B :

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_3} = \frac{1}{11,6 + \sqrt{7v_B}} \quad (4.5)$$

Конструкція корпусу реактора виконана зі сталі товщиною $\delta = 7$ мм (коефіцієнт теплопровідності $52 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$) та захищена мінераловатними листами товщиною 80 мм (коефіцієнт теплопровідності $0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$). За таких умов необхідна теплова енергія для підтримання мезофільного режиму в біореакторі об'ємом $V = 10 \text{ м}^3$ в холодну пору року складає до 65 МДж на добу, або $18,07 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Порівняльний аналіз витрат енергії варіантів системи

• *Традиційна система підігріву та перемішування:* При використанні внутрішніх трубчастих теплообмінників загальний ККД передачі тепла від котла до біомаси становить $75\text{--}85\%$ через втрати в підвідних магістралях та утворення накипу. Крім того, близько 6% теплоти витрачається через стінки й захисний кожух безпосередньо в довкілля. Через це традиційній системі підігріву для компенсації втрат необхідно генерувати $23,94 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ теплової енергії на добу. Для механічного перемішування використовуються два асинхронні двигуни типу 4ВР71В6 ($0,55 \text{ кВт}$, ККД $58,0\%$) у вибухобезпечному виконанні з редуктором. При рекомендованих 6 циклах перемішування на добу по 20 хвилин загальна витрата електричної енергії на перемішування з урахуванням втрат становить $2,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на добу (втрати у двигунах та редукторі складають $0,924 \text{ кВт} \cdot \text{год}$). Сумарне добове споживання традиційної системи дорівнює: $23,94 + 2,2 = 26,14 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

• *Запропонована система на базі ПЕМП:* Необхідний тепловий потік забезпечується двома заглибними ПЕМП зі споживаною активною потужністю $4,8 \text{ кВт}$ кожний. При цьому лише 5% цієї потужності витрачається на механічну

роботу з перемішування субстрату, а решта втрат енергії повністю трансформується в корисне тепло безпосередньо всередині біомаси. Загальна витрата енергії комплексу на базі ПЕМП становить строго 19,2 кВт · год на добу.

Економія енергії на власні потреби біогазової установки при впровадженні системи підігріву та перемішування з використанням заглибного ПЕМП становить:

$$\Delta W\% = \frac{26,14-19,2}{26,14} \cdot 100\% = 26,5\% \quad (4.6)$$

Порівняльний аналіз капітальних витрат (CAPEX)

Для проведення глибокого техніко-економічного аналізу розроблених інженерних рішень виконано деталізоване порівняння структури капітальних інвестицій (CAPEX) між традиційною схемою автоматизації та тепломеханічного забезпечення біореактора об'ємом 10 м³ і пропонованим заглибним електротехнічним комплексом. Фінансові показники базового варіанта сформовано на основі чинних прайс-листів офіційних дистриб'юторів промислового обладнання в Україні, а показники пропонованої системи - на основі фактичної специфікації матеріалів (ВОМ) і витрат на виготовлення дослідних зразків.

Загальний обсяг капітальних витрат для традиційної системи ($CAPEX_{\text{баз}}$) визначається сумою витрат на промивочні засоби автоматизації технологічного процесу та окреме тепломеханічне обладнання[121]:

$$CAPEX_{\text{баз}} = C_{\text{ПЛК}} + C_{\text{мех}} \quad (4.7)$$

де $C_{\text{ПЛК}}$ - вартість центральної шафи керування на базі промислового програмованого логічного контролера (ПЛК), модулів розширення, НМІ-панелі та ліцензійного програмного забезпечення; $C_{\text{мех}}$ - сумарна вартість дискретних технологічних вузлів, що включають механічні тихохідні мішалки з редукторами, водогрійний котел із циркуляційними помпами, систему внутрішніх теплообмінних панелей та зовнішні електромагнітні стимулятори.

Відповідно до ринкових даних, мінімальна вартість збірки шафи АСУ ТП на базі контролера серії Siemens SIMATIC S7-1200 із необхідною сигнальною периферією становить $C_{\text{ПЛК}} = 100\,000$ грн, а комплект допоміжного механічного та теплового

устаткування для реактора на 10 м³ оцінюється в $C_{\text{мех}} = 120\,000$ грн. Таким чином, базова величина капітальних інвестицій становить:

$$CAPEX_{\text{баз}} = 100\,000 + 120\,000 = 220\,000 \text{ грн}$$

Для пропонованого варіанта архітектура комплексу базується на принципі апаратної інтеграції та поліфункціональності, що дозволяє суттєво мінімізувати матеріаломісткість. Загальний обсяг капітальних витрат розробленого комплексу ($CAPEX_{\text{проп}}$) розраховується як:

$$CAPEX_{\text{проп}} = C_{\text{мех_ПЕМП}} + C_{\text{ел_кер}} + C_{\text{опл_праці}} \quad (4.8)$$

де $C_{\text{мех_ПЕМП}}$ - капітальні витрати на виготовлення механічної частини трьох заглибних ПЕМП; $C_{\text{ел_кер}}$ - собівартість інтегрованої мікропроцесорної системи моніторингу та регулювання; $C_{\text{опл_праці}}$ - витрати на складальні, монтажні та пусконаладжувальні роботи.

Зведена структура порівняльного аналізу елементів CAPEX для обох варіантів технічної реалізації наведена в таблиці 4.3.

Сумарні капітальні витрати на технічну реалізацію пропонованого комплексу згідно з розрахунковими даними таблиці 4.3 становлять:

$$CAPEX_{\text{проп}} = 43\,110 + 10\,194 + 15\,000 = 68\,304 \text{ грн}$$

Для кількісної оцінки економічної ефективності зниження капітальних інвестицій використано показник відносного скорочення витрат ($\Delta CAPEX$, %):

$$\Delta CAPEX = \frac{CAPEX_{\text{баз}} - CAPEX_{\text{проп}}}{CAPEX_{\text{баз}}} \cdot 100\% \quad (4.9)$$

$$\Delta CAPEX = \frac{220\,000 - 68\,304}{220\,000} \cdot 100\% = \frac{151\,696}{220\,000} \cdot 100\% \approx 68,95\%$$

Показник кратності інтеграції та відповідної оптимізації початкових капітальних інвестицій (коефіцієнт економічної ефективності структури CAPEX - $K_{\text{еф}}$) визначається відношенням порівнюваних величин:

$$K_{\text{еф}} = \frac{CAPEX_{\text{баз}}}{CAPEX_{\text{проп}}} = \frac{220\,000}{68\,304} \approx 3,22 \text{ рази} \quad (4.10)$$

Таблиця 4.3

Зведена структура порівняльного аналізу елементів CAPEX для обох варіантів технічної реалізації

Категорія / Елемент витрат	Традиційна система (Базовий варіант), грн	Розроблений комплекс (Пропонований варіант), грн
1. Керуюча логіка та автоматизація (АСУ ТП)		
Промисловий ПЛК (Siemens S7-1200), модулі вимірювання, HMI-панель, ліцензійне ПЗ	100 000	-
Комплект контролерів (Arduino Nano V3.0, LGT8F328P, ESP32-S2 Mini)	-	480
2. Силова частина та вимірювальні канали зв'язку		
Вимірювальні багатофункціональні модулі (PZEM-004T-100A, 9 шт.)	-	3 330
Силова комутація (симістори TPDV1240, оптопары FOD814A, 9 шт.)	-	1 530
Сенсорна мережа розподіленого контролю (13 шт. DS18B20, 2 шт. АНТ10)	-	1 144
Радіомодулі зв'язку (JDY-40), блоки живлення, 3D-друк корпусів плат	-	910
Електротехнічна обв'язка, автоматичні вимикачі, дискретні елементи плат	-	2 800
3. Силове технологічне та виконавче обладнання		
Комплект тепломеханічного устаткування (мішалки, котел, помпи, теплообмінники)	120 000	-
Ротори синхронного двигуна 5.5 кВт (3 шт. для основи ПЕМП)	-	30 000
Конструкційні матеріали перетворювачів (сталеві труби 160x4 мм, фланці, сальники)	-	7 110
Послуги токарної та зварювальної обробки елементів ПЕМП	-	6 000
4. Інжиніринг та монтажні роботи		
Збирання електронних плат, монтаж шафи, програмування та пусканалагодження	включено в п.1	15 000
РАЗОМ КАПІТАЛЬНІ ВИТРАТИ (CAPEX):	220 000	68 304

Аналіз отриманих результатів показує, що пропонуване інженерне рішення дозволяє зменшити початкові капітальні вкладення на 68,95%, тобто більш ніж у 3,22 рази. Такий високий показник економічної ефективності досягається за рахунок дії двох ключових чинників:

1. Елімінування дороговартісних компонентів загальнопромислової автоматизації (ПЛК, НМІ) та їх заміна на оптимізовану плату керування на базі доступних мікроконтролерів сімейства AVR та силового модуля ESP32-S2 Mini, яка забезпечує високу завадостійкість і метрологічну точність за рахунок розроблених алгоритмічних методів цифрової фільтрації сигналів та гальванічної розв'язки.

2. Об'єднання функцій перемішування, безпосереднього теплового нагрівання й електромагнітної стимуляції субстрату в єдиному конструктивному вузлі заглибного ПЕМП на базі серійних роторів кранових двигунів (5.5 кВт) та сталевих труб діаметром 160 мм. Це повністю виключає потребу у придбанні окремого котельного обладнання, зовнішніх індукторів та складних механічних редукторних приводів.

Це створює міцний економічний фундамент для суттєвого прискорення терміну окупності всього проекту модернізації та впровадження електротехнічного комплексу на біогазовій установці.

Аналіз операційних витрат (ОРЕХ) та формування грошового потоку

Річні експлуатаційні (операційні) витрати (ОРЕХ) традиційних біогазових установок малого об'єму характеризуються значними фінансовими видатками на періодичну заміну елементів вимірювальних каналів, високою трудомісткістю ручного очищення технологічних сенсорів, а також підвищеним рівнем споживання електричної та теплової енергії допоміжними системами.

Формування річного чистого грошового потоку CF , (грн/рік), який генерується в результаті модернізації та впровадження розробленого електротехнічного комплексу, базується загальноприйнятій методології оцінки економічної ефективності інвестицій[121] на додаванні двох основних складових - прямого зниження операційних витрат на технічне обслуговування й заміну сенсорів $\Delta OPEX$, (грн/рік) та

додаткового комерційного доходу від реалізації (або внутрішнього заміщення) надлишкової енергії інтенсифікованого метаногенезу ΔE , грн/рік):

$$CF = \Delta OPEX + \Delta E \quad (4.11)$$

Кількісна оцінка економії на операційному обслуговуванні ($\Delta OPEX$)

У класичних системах промислові рН-електроди з тефлоновою діафрагмою (PTFE) перебувають у постійному контакті з високоагресивним середовищем біореактора, що є неньютонівською рідиною з високою концентрацією абразивних і рухомих механічних фракцій. Це призводить до швидкої деградації, забруднення та механічного розбиття скляних електродів, обумовлюючи потребу в їхній заміні щонайменше 1–2 рази на рік. Ринкова вартість одного якісного промислового рН-сенсора (наприклад, Endress+Hauser серії CPS11E) в Україні становить близько 45 000 грн.

Впровадження розробленого пристрою автоматичного контролю (ПАК), що функціонує за жорстким послідовним алгоритмом «Зупинка та вимірювання» («Сховати-Промити-Виміряти»), повністю унеможлиблює механічне пошкодження тендітних рН-електродів рухомими фракціями субстрату під час перемішування. Наявність інтегрованої підсистеми гідроструминного очищення каретки сенсорів (форсунки 0,8 мм під тиском 0,86 МПа) забезпечує автоматичне змивання біоплівки та осаду, продовжуючи нормативний термін експлуатації датчика.

Економія операційних витрат за рахунок запобігання щонайменше одній позаплановій заміні сенсора на рік розраховується як:

$$\Delta OPEX = C_{\text{електрод}} \cdot n \quad (4.13)$$

$$\Delta OPEX = 45\,000 \cdot 1 = 45\,000 \text{ грн/рік.}$$

Крім прямого фінансового ефекту, автоматизація процесу очищення усуває потребу в зупинці реактора, його розгерметизації та ручному демонтажі датчиків персоналом біогазової станції, що забезпечує безперервність метаногенезу та виключає аварійні втрати біогазу в атмосферу.

Монетизація ефекту енергетичного синергізму (ΔE)

Електрофізичний вплив магнітного поля, що генерується заглибними ПЕМП безпосередньо в зоні контакту виконавчих органів із субстратом, активізує життєдіяльність бактерій і суттєво підвищує добовий вихід біогазу, що доведено рядом експериментальних досліджень [122]. З метою уникнення завищення економічних показників, для подальшого розрахунку беремо мінімально гарантований ефект (узагальнений у табл. 4.2) – стабільне зростання добового виходу біогазу на 12% при індукції 15 мТл.

Річний обсяг додатково отриманого біогазу $\Delta V_{\text{рік}}$, м³/рік) для реактора об'ємом 10 м³ за базової продуктивності 10 м³/добу становить:

$$\Delta V_{\text{рік}} = V_{\text{доб}} \cdot \alpha \cdot 365 \quad (4.14)$$

$$\Delta V_{\text{рік}} = 10 \cdot 0,12 \cdot 365 = 438 \text{ м}^3/\text{рік}.$$

Переведення обсягу отриманого газу в еквівалентну електричну енергію $\Delta W_{\text{рік}}$, кВт·год/рік) здійснюється з урахуванням енергетичної цінності біогазу ($E_{\text{екв}} = 6$ кВт·год/м³):

$$\Delta W_{\text{рік}} = \Delta V_{\text{рік}} \cdot E_{\text{екв}} \quad (4.15)$$

$$\Delta W_{\text{рік}} = 438 \cdot 6 = 2628 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{рік}.$$

При розрахунку грошового еквіваленту отриманої енергії використано усереднений ринковий тариф на електричну енергію для побутових споживачів (підприємств) в Україні, який складає $T_{\text{ел}} = 8,50$ грн за 1 кВт·год:

$$\Delta E = \Delta W_{\text{рік}} \cdot T_{\text{ел}} \quad (4.16)$$

$$\Delta E = 2628 \cdot 8,50 = 22\,338 \text{ грн}/\text{рік}.$$

Додатково в операційному балансі враховується те, що повний ККД розробленого заглибного ПЕМП сягає 99%, оскільки всі теплові втрати в обмотках статора, масивному роторі (струми Фуко) та вузлах тертя повністю поглинаються рідким неньютонівським субстратом, виконуючи функцію його цільового нагріву й

повністю замінюючи роботу зовнішнього теплообмінника та циркуляційних pomp традиційної системи.

Розрахунок сумарного річного грошового потоку (CF). Підставляючи отримані кількісні значення складових у вираз, визначаємо величину щорічного вільного грошового потоку, що формується після впровадження розробленого комплексу:

$$CF = \Delta OPEX + \Delta E = 45\,000 + 22\,338 = 67\,338 \text{ грн/рік.} \quad (4.17)$$

Таким чином, стабільне надходження додаткового грошового потоку в розмірі 67 338 грн щорічно створює об'єктивні передумови для забезпечення високої економічної ефективності та швидкої рекуперації капітальних вкладень, спрямованих на виготовлення й монтаж комплексу.

Розрахунок показників інвестиційної привабливості

Фінальним етапом оцінки доцільності модернізації та впровадження розробленого електротехнічного комплексу є інтегральний розрахунок динамічних показників інвестиційної ефективності проекту. Розрахунок показників інвестиційної привабливості та визначення капітальних витрат проведено за класичною методологією техніко-економічного аналізу (Techno-Economic Assessment)[119] для горизонту планування $T = 5$ років та базової ставки дисконтування $r = 10\%$ (0,1), що відповідає середньоринковим вимогам до проектів у сфері відновлюваної енергетики та енергозбереження в Україні.

1) Простий термін окупності проекту (PP, роки)

Простий термін окупності визначає часовий інтервал, за який первинні капітальні інвестиції I_0) повністю покриваються недисконтованим щорічним вільним грошовим потоком (CF) від реалізації проекту

$$PP = \frac{I_0}{CF} \quad (4.18)$$

Підставляючи раніше отримані значення капітальних витрат ($I_0 = 68\,304$ грн) та річного інтегрального грошового потоку ($CF = 67\,338$ грн/рік), обчислюємо простий термін окупності комплексу:

$$PP = \frac{68\,304}{67\,338} \approx 1,01 \text{ року (або 12 місяців і 5 днів).}$$

2) Чистий дисконтований дохід (NPV, грн)

Чистий дисконтований дохід є базовим критерієм оцінки фінансової спроможності інженерних рішень в умовах часової зміни вартості грошей. Він розраховується як різниця між сумою дисконтованих грошових потоків за кожен рік експлуатації комплексу та величиною початкового CAPEX[119]:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF}{(1+r)^t} - I_0 \quad (4.20)$$

Враховуючи стабільність щорічних надходжень, формула дисконтування ануїтету набуває вигляду:

$$NPV = CF \cdot \left[\frac{1-(1+r)^{-T}}{r} \right] - I_0 \quad (4.21)$$

Коефіцієнт дисконтування ануїтету для $T = 5$ та $r = 0,1$ становить:

$$\sum_{t=1}^5 \frac{1}{(1+0,1)^t} = \frac{1 - (1+0,1)^{-5}}{0,1} \approx 3,7908$$

Підставляючи кількісні дані у вираз, отримуємо інтегральний економічний ефект за 5 років експлуатації комплексу:

$$NPV = 67\,338 \cdot 3,7908 - 68\,304 = 255\,265 - 68\,304 = 186\,961 \text{ грн.}$$

3) Динаміка кумулятивного дисконтованого грошового потоку

Для детального моніторингу процесу повернення капітальних інвестицій та визначення точного дисконтованого терміну окупності побудовано покрокову структуру накопичення капіталу за роками (Таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 - Покрокова динаміка дисконтованих грошових потоків та окупності комплексу

Рік (t)	Чистий грошовий потік (CF), грн	Коефіцієнт дисконтування, $1/(1+r)^t$	Дисконтований грошовий потік (DCF), грн	Кумулятивний дисконтований потік, грн
0	-	1	-	-68 304
1	67 338	0,9091	61 217	-7 087
2	67 338	0,8264	55 648	48 561
3	67 338	0,7513	50 591	99 152
4	67 338	0,683	45 992	145 144
5	67 338	0,6209	41 817	186 961

Аналіз даних таблиці 4.4 показує, що дисконтований термін окупності (DPP), який враховує знецінення грошових потоків у часі, становить:

$$DPP = 1 + \frac{|-7\,087|}{55\,648} \approx 1,13 \text{ року (або 13 місяців і 17 днів).}$$

Проведений комплексний кількісний техніко-економічний аналіз безальтернативно доводить високу інвестиційну привабливість і фінансову спроможність розробленої технології модернізації малих біогазових установок. Позитивне інтегральне значення чистого дисконтованого доходу ($NPV = 186\,961$ грн) за розрахунковий 5-річний період та надзвичайно короткі терміни рекуперації капіталу (простий термін окупності - 12 місяців, дисконтований - 13,5 місяців) свідчать про беззаперечну рентабельність впровадження розробленого електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора.

Впровадження комплексу на базі заглибних ПЕМП та ПАК забезпечує подолання технологічного бар'єру класичних систем нагріву й перемішування, перетворюючи внутрішні електромагнітні втрати обладнання на корисне тепло і водночас інтенсифікуючи вихід біогазу на 12% за рахунок магнітної стимуляції, що робить його високоефективним рішенням для енергонезалежних агропромислових об'єктів.

Обґрунтування технічних рішень по забезпеченню вибухозахищеності електрообладнання електротехнічного комплексу представлено у Додатку К.

Висновки до розділу 4

- Підтверджено розрахункові параметри магнітного поля ПЕМП. У режимі загальмованого ротора максимальна нормальна складова магнітної індукції на поверхні масивного феромагнітного ротора становить 44 мТл, що має відхилення від теоретичної моделі не більше 12 %. Доведено наявність яскраво вираженого скін-ефекту: масивний ротор виконує роль електромагнітного екрана, замикаючи більшу частину потоку у власній стінці та перетворюючи його на теплову енергію через вихрові струми.

- Доведено абсолютну енергетичну перевагу симісторного регулювання. Порівняльний аналіз режимів живлення показав, що несинусоїдальна форма напруги симісторного регулятора (амплітудне значення 185 В при діючому 79 В) глибоко проникає в масив ротора. Це забезпечує зростання активної потужності до 1400–1500 Вт, крутний момент на рівні 6,5-7 Н*м та ефективний нагрів субстрату на 1 °С лише за 11 хвилин.

- Виявлено неефективність альтернативних методів живлення для нагріву. Живлення від автотрансформатора генерує низьку активну потужність (700 Вт) і забезпечує критично малий градієнт нагріву (0,08 °С/хв). Використання частотного перетворювача в режимі скалярного керування на низьких частотах (6,8-6,9 Гц) призводить до екстремальних струмів статора (до 25,3 А), аварійних зупинок інвертора та повної відсутності тепловіддачі в субстрат (температура рідини залишалася на рівні 10,2 °С протягом 12 хвилин).

- Забезпечено високу завадостійкість і точність системи телеметрії. Безконтактна передача даних через обертовий трансформатор довела свою стабільність в умовах нагріву до 42 °С та інтенсивних електромагнітних завад. Апаратні збої на шині 1-Wire повністю нівелюються програмним алгоритмом Hold-Last-Value на боці ПК. Метрологічна похибка вимірювань електричних величин модулями PZEM-004T не перевищує 1-2 %, а температурних (DS18B20) $\pm 0,5$ °С. Радіомодулі JDY-40 (2,4 ГГц) гарантують швидкісну передачу без втрати пакетів.

- Обґрунтовано безпечний алгоритм просторово-часової взаємодії ПАК та ПЕМП. Розроблений жорсткий алгоритм «Сховати-Промити-Виміряти» повністю унеможлиблює розбиття прецизійних скляних рН-електродів турбулентними потоками та твердими включеннями субстрату під час обертання ПЕМП. Інтегроване гідроструминне очищення каретки (тиск 0,86 МПа, форсунки 0,8 мм) забезпечує змивання біоплівки та гарантує метрологічну достовірність вимірювань.

- Доведено високу комерційну рентабельність інновації. Для пілотного біореактора об'ємом 10 м³ впровадження розробленого електротехнічного комплексу дозволяє знизити капітальні витрати (CAPEX) у 3,22 раза - на 68,95 % (з 220 000 грн до 68 304 грн). Добове споживання енергії на власні потреби установки зменшується на 26,5 % (з 26,14 до 19,2 кВт·год), при цьому загальний ККД ПЕМП сягає 99 %.

- Підтверджено інвестиційну привабливість проекту. Енергетичний синергізм (збільшення виходу біогазу на 12 % під дією магнітного поля індукцією 15 мТл) та скорочення операційних витрат на заміну сенсорів формують стабільний чистий грошовий потік на рівні 67 338 грн/рік. Проект модернізації характеризується простим терміном окупності (PP) 1,01 року, дисконтованим терміном окупності (DPP) 1,13 року та генерує чистий дисконтований дохід (NPV) у розмірі 186 961 грн за горизонт планування 5 років.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо підвищення енергетичної ефективності та надійності функціонування малих і середніх біогазових установок шляхом розроблення та впровадження електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання на базі заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП) та пристрою автоматичного контролю (ПАК).

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Обґрунтування концепції та структури: Розроблено нову архітектуру електротехнічного комплексу для біореакторів, яка вперше об'єднує функції гідродинамічного перемішування, прямого тепловиділення (за рахунок індукції струмів Фуко) та магнітної стимуляції субстрату в єдиному заглибному агрегаті.

2. Математичне моделювання та дослідження магнітного поля: Розроблено математичні моделі електромагнітних процесів ПЕМП та експериментально доведено, що масивний феромагнітний ротор виконує роль електромагнітного екрана з добре вираженим скін-ефектом. Нормальна складова магнітної індукції на поверхні ротора в загальмованому стані сягає 44 мТл (розбіжність із теоретичною моделлю не перевищує 12 %). Це забезпечує біологічно активний рівень магнітної стимуляції метаногенних бактерій без шкідливого впливу на периферійне обладнання.

3. Оптимізація режимів живлення та тепловиділення: Доведено абсолютну енергетичну перевагу використання симісторного регулятора напруги. Несинусоїдальна форма напруги (амплітудне значення 185 В, діюче складає 79 В) інтенсифікує струми Фуко в масиві ротора, забезпечуючи зростання активної потужності до 1400-1500 Вт і крутного моменту до 6,5-7 Н·м. Це дозволяє нагрівати субстрат на 1 °С за 11 хвилин.

4. Оцінка неефективності альтернативних методів нагріву: Експериментально встановлено, що живлення ПЕМП від автотрансформатора дає лише 700 Вт активної потужності (градієнт нагріву становить 0,08 °С/хв). Використання частотного перетворювача на низьких частотах (6,8-6,9 Гц) зумовлює екстремальні струми статора до 25,3 А при повній відсутності корисної тепловіддачі в субстрат.

5. Забезпечення надійності безконтактної телеметрії: Верифіковано роботу системи безконтактної передачі енергії та даних на базі обертового трансформатора. Радіомодулі JDY-40 (2,4 ГГц) гарантують стабільний зв'язок в умовах нагріву ПЕМП до 42 °С та наявності електромагнітних завад від силових ключів. Апаратні збої шини 1-Wire успішно фільтруються програмним алгоритмом Hold-Last-Value на боці ПК. Метрологічна похибка електричних вимірювань (PZEM-004T) не перевищує 1-2 %, температурних (DS18B20) складає $\pm 0,5$ °С.

6. Апаратно-програмна інтеграція: Створено спеціалізоване програмне забезпечення на базі Python для централізованого збору телеметрії. Програма реалізує просторово-розподілений контроль температурного поля, автоматизоване ведення протоколів в режимі реального часу.

7. Просторово-часова взаємодія та автоматичне очищення: Обґрунтовано жорсткий алгоритм керування, який виключає механічне розбиття прецизійних скляних рН-електродів турбулентними потоками під час обертання ротора з частотою до 102 об/хв. Доведено ефективність інтегрованої системи гідроструминного очищення каретки сенсорів, що забезпечує автоматичне видалення біоплівки та зберігає достовірність показників без розгерметизації реактора.

8. Техніко-економічна ефективність впровадження: Для базового біореактора об'ємом 10 м³ використання розробленого комплексу знижує капітальні витрати у 3,22 раза (на 68,95 %): з 220 000 грн до 68 304 грн. Добове споживання енергії на власні потреби зменшується на 26,5 % (до 19,2 кВт*год), а загальний ККД електромеханічного перетворювача при цьому сягає 99 %.

9. Інвестиційна привабливість проєкту: Енергетичний синергізм комплексу (збільшення виходу біогазу на 12 % під дією магнітного поля індукцією 15 мТл) та супутня економія на заміні пошкоджених сенсорів формують стабільний чистий грошовий потік 67 338 грн/рік. Динамічні показники підтверджують беззаперечну рентабельність модернізації: чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років становить 186 961 грн, простий термін окупності (PP) дорівнює 1,01 року, а дисконтований (DPP) складає 1,13 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kaletnik G. Production and use of biofuels: Second edition, supplemented. Vinnytsia: Nilan-Ltd, 2018. 336 p. URL: <https://vsau.vin.ua/repository/card.php?lang=uk&id=27846>
2. Salminen E., Rintala J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review. Bioresource Technology. 2002. Vol. 83(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. Гелету́ха Г. Г., Кучерук П. П., Матвеєв Ю. Б. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Аналітична записка БАУ № 21. Київ: Біоенергетична асоціація України, 2019. 32 с. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/position-paper-uabio-21-ua.pdf>
4. Appels L., Baeyens J., Degreève J., Dewil R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science. 2008. Vol. 34, № 6. P. 755–781. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
5. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси. Енергетика і автоматика. 2020. № 5. С. 136–148. DOI: <https://doi.org/10.31548/energiya2020.05.136>
6. Zablodskiy M. M., Spodoba M. O. Improvement of the method for determining energy consumption in a biogas reactor. Proceedings of ICEPOM-12. 2020. P. 311. URL: https://www.researchgate.net/publication/355147539_ICEPOM-12_Abstract_book_final
7. Коваленко В. Л. Електрофізичні методи підвищення ефективності біогазових технологій: дис. д-ра техн. наук: 05.14.08. Київ, 2020. URL: <https://tinyurl.com/kovalenko-v-l>
8. Funke A., Grandl R., Ernst M., Dahmen N. Modelling and improvement of heat transfer coefficient in auger type reactors for fast pyrolysis application. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2018. Vol. 130. P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.05.023>

9. Terashima M., Goel R., Komatsu K., Yasui H. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, № 7. P. 2228–2233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.069>
10. Gorobets V., Antypov I., Trokhaniak V. Experimental and numerical studies of heat and mass transfer in low-temperature heat accumulator. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 240. Article 01009. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824001009>
11. Submersible mixers for biogas. <https://www.suma.de/en/agitator-optimix-4g.php>
12. Three-phase submersible motor. https://www.bauer-br.com/wp-content/uploads/sites/8/BAU_019_02-FD-TMRW-EN_preview.pdf
13. Submersible mixer ORKA-EX. <https://www.reckagrartechnik.com/en/products/stirring-technology/submersible-mixer/o/>
14. Mao C., Feng Y., Wang X., Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 45. P. 540–555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
15. Meegoda J. N., Ezikpe B., Chueng H. G., Defoe J. N. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15, № 10. Article 2224. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
16. Deublein D., Steinhauser A. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. 2nd Edition. Wiley-VCH, 2011. 578 p. <https://doi.org/10.1002/9783527632794>
17. Terashima M., Goel R., Komatsu K., Yasui H., Takahashi H., Li Y. Y., Noike T. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, № 7. P. 2228–2233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.069>
18. Wellinger A., Murphy J., Baxter D. (eds.). *Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. - Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. - 624 p. - Режим доступа: <https://doi.org/10.1533/9780857097415>

19. Doyle J. D., Parsons S. A. Struvite formation, control and recovery. *Water Research*. 2002. Vol. 36, № 16. P. 3925–3940. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00126-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00126-4)
20. Turovskiy I. S., Mathai P. K. *Wastewater Sludge Processing*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 354 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/047179161X>
21. Zablodskiy M. M., Spodoba M. O., Spodoba O. O. Experimental investigation of energy consumption for the process of initial heating of a substrate to the fermentation temperature. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. 1, № 53. P. 82–93. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.1-53.07>
22. Lindmark J., Thorin E., Bel Fdhila R., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 40. P. 1030–1047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.182>
23. Kaparaju P. et al. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 4919–4928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.015>
24. Ganidi N., Tyrrel S., Cartmell E. Anaerobic digestion foaming causes – A review. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, № 23. P. 5546–5554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.024>
25. Singh B., Szamosi Z., Siménfalvi Z. State of the art on mixing in an anaerobic digester: A review. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 141. P. 922–936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.072>
26. Dapelo D., Alberini F., Bridgeman J. Analysis of anaerobic digester mixing: comparison of long shafted paddle mixing vs gas mixing. *Water Science and Technology*. 2020. Vol. 81, № 7. P. 1406–1414. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.248>
27. Zablodskiy M., Gritsyuk V., Rudnev Y., Brozhko R., Tymofieieva O. Analysis of 3D eddy current distribution in a hollow rotor of an electromechanical converter. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv, 2020. P. 561–564. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088777>
28. Zablodskiy M., Spodoba M. Dynamic analysis of energy consumption during substrate fermentation in a biogas reactor. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced

Technology (KhPIWeek). Kharkiv, 2021. P. 147–152. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569995>

29. Madsen M. et al. Monitoring of anaerobic digestion processes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. P. 3141–3155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.026>

30. Eshtiaghi N., Markis F., Yap S. D., Baudez J. C., Slatter P. Rheological characterization of municipal sludge: A review. *Water Research*. 2013. Vol. 47, № 15. P. 5493–5510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.001>

31. Nguyen D., Gadhamshetty V., Nitayavardhana S., Khanal S. K. Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 193. P. 513–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.080>

32. Ward A. J. et al. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 7928–7940. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>

33. Boe K., Batstone D. J., Steyer J.-P., Angelidaki I. State indicators for anaerobic digestion. *Water Research*. 2010. Vol. 44, № 20. P. 5973–5980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.043>

34. Bhat S. A., Saraf D. N., Gupta S., Gupta S. K. Use of agitator power as a soft sensor for bulk free-radical polymerization of methyl methacrylate in batch reactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2006. Vol. 45, № 12. P. 4243–4255. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie0509802>

35. Zablodskiy 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>

36. Zablodskiy, M., Babak, D, Radko I., Klendiy P. (2026). Remote monitoring of the condition of a submersible multifunctional electromechanical transducer in a bioreactor. *Power Systems and Microgrids I. VI: Volume II: Power Engineering and Environmental Safety* (pp. 537-557). Cham: Springer Nature Switzerland

37. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18143849>
38. Пат. 155766 Україна, МПК G01N 1/10. Пристрій для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах / Заблодський М. М., Бабак Д. О., Троханяк В. І., Шворов С. А. № u202305616; заявл. 22.11.2023; опубл. 04.04.2024, Бюл. № 14/2024. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1791043/>
39. Zablodskiy, M., Klendiy, P., Dudar, O., & Babak, D. (2024). Energy Efficiency of the Extrusion Process and its Effect on Output of Biogas during the Fermentation of Maize and Rape Straw. *Problemele Energeticii Regionale*, 61(1), 127-139. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.1-61.11>
40. StepperMotor/&gad_source=1&gad_campaignid=20797287833&gbraid=0AAA
D8T718h_4zvqpZGeE5LFOZAhSVHq&gclid=CjwKCAiAkvdMBhBMEiwAnUA9BQ11
ri_WAhiA64CRsgkVQIHRYXDHRGbxq3TChKmZ3cDOe4sk9nXCvxoCMPkQAvD_Bw
E
41. Кулаков О. В., Росоха В. О. Електротехніка та пожежна профілактика в електроустановках: підручник. Харків: НУЦЗУ, 2010. 569 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/7640/1/1-16.pdf>
42. Вибухонебезпечні середовища. Частина 0. Електрообладнання. Загальні вимоги (ІЕС 60079-0:2007, MOD): ДСТУ 7113:2009. Видання офіційне. Київ: Держспоживстандарт України, 2012. 66 с. URL: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU2/dstu_7113-2009.pdf
43. ATEX –European standard for explosion-proof equipment / <https://ogrant.com.ua/atex/>
44. Motion Control, Robotic, & Mechatronic Solutions Across Canada. www.electromate.ca ,
45. The only internationally certified hazardous location stepper motor available. <https://www.mclennan.co.uk/hx56-100-step-motor-for-hazardous-locations%20>

46. Заблодський М. М., Плюгін В. Є., Грицюк В. Ю. Електричні поліфункціональні агрегати в технологіях переробки дисперсних речовин: Монографія. Київ: ЦП «Компрінт», 2017. 316 с.

47. Спосіб автоматичного управління параметрами процесу анаеробного бродіння та устаткування для його здійснення: пат. 119015 Україна: МПК С12М1/02 (2006) / Заблодський М. М., Савченко В. В., Синявський О. Ю., Чуєнко Р. М.; заявник і патентовласник НУБіП України. № а201712344; заявл. 13.12.2017; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7/2019. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1345084/>

48. Wang, H., Xu, J., Sheng, L., Liu, X., Zong, M., & Yao, D. (2019). Anaerobic digestion technology for methane production using deer manure under different experimental conditions. *Energies*, 12(9), 1819. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12091819>

49. Sarvenoei, F.F.; Zinatizadeh, A.A.; Zangeneh, H. A novel technique for waste sludge solubilization using a combined magnetic field and CO₂ injection as a pretreatment prior anaerobic digestion. *J. Clean. Prod.* 2018, 172, 2182–2194. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.11.195>

50. Chen, Y.J.; Xue, Q.; Liu, L.; Kong, Y.; He, X.X.; Ma, J.; Ge, S.; Yuan, Z.M. Influences of magnetic powder addition on the anaerobic digestion of municipal dewatered sludge. *Environ. Prog. Sustain.* 2019, 38, 374–379. DOI: <https://doi.org/10.1002/ep.12972>

51. Debowski, M.; Zielinski, M.; Kisielewska, M.; Hajduk, A. Effect of constant magnetic field on anaerobic digestion of algal biomass. *Environ. Technol.* 2016, 37, 1656–1663. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1126362>

52. Zieliński, M., Zielińska, M., Cydzik-Kwiatkowska, A., Rusanowska, P., & Dębowski, M. (2021). Effect of static magnetic field on microbial community during anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 323, 124600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124600>

53. Beretta, G., Mastorgio, A. F., Pedrali, L., Saponaro, S., & Sezenna, E. (2019). The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(1), 29-75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-018-09491-9>

54. Zablodskiy, M., Kozyrskiy, V., Zhylytsov, A., Savchenko, V., Sinyavsky, O., Spodoba, M., Klendiy, P. and Klendiy, G., 2020, April. Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field. In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (pp. 530-535). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088763>
55. Funke A., Grandl R., Ernst M., Dahmen N. Modelling and improvement of heat transfer coefficient in auger type reactors for fast pyrolysis application. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2018. Vol. 130. P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.05.023>
56. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.003>
57. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14135858>
58. 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, article number 1170133. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1170133>
59. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.101>
60. 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), article number 2369. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052369>

61. Papastergiou, K. D., & Macpherson, D. E. (2007). An airborne radar power supply with contactless transfer of energy—Part I: Rotating transformer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(5), 2874-2884. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.902044>
62. Chen, Z., Hong, J., Zhang, Y., Kong, Y., Zhao, X., & Chen, S. (2023). A Contactless Energy Transfer System With High Misalignment Tolerance for Rotary Ultrasonic Machining. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(7), 8028-8037. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3283683>
63. Potter, B. A., & Shirsavar, S. A. (2006, November). Design, implementation and characterisation of a contactless power transfer system for rotating applications. In *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics* (pp. 2168-2173). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347406>
64. Thenathayalan, D., & Park, J. H. (2015). Wide-air-gap transformer model for the design-oriented analysis of contactless power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), 6345-6359. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2423662>
65. Trevisan, R., & Costanzo, A. (2014). A 1-kW contactless energy transfer system based on a rotary transformer for sealing rollers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 6337-6345. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2311395>
66. 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. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921812>
67. 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. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM61530.2024.10609172>
68. 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. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2016.7538876>

69. Ditze, S. (2014, September). Steady-state analysis of the bidirectional CLLLC resonant converter in time domain. In IEEE 2014 International Telecommunications Energy Conference (INTELEC) (pp. 1-9). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2014.6972179>
70. Zablodskiy, N. (2023). Research of the Influence of the Combined Electromagnetic Field on Biogas Output. *Problemele Energeticii Regionale*, 58(2), 81-96. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-08>
71. Dai, M., Meng, B., Tong, C., Li, S., & Ruan, J. (2025). Analytical modeling and experimental validation of the churning torque based on partial oil immersion wet external rotor permanent magnet BLDC motor with an isolation sleeve. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 235, 112882. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112882>
72. Singh, A., & Khosla, A. (2025). A survey and analysis of multiphase electric propulsion motors and associated controllers for driving underwater platforms. *Propulsion and Power Research*, 14(2), 304-321. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2025.06.001>
73. J.Q.T. Huynh. Detailed Design of a Thruster Solution for a Small Mass-Market Remotely Operated Underwater Vehicle, M.S. Thesis Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway (2016) [URL:https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2416482](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2416482)
74. Fan T, Li Q, Li Y, Wen X, Zhuang X. Influence of design parameters on characteristics of external-rotor permanent magnet synchronous machine. In: International conference on electrical machines and systems. 2017. p. 1–6.
75. Wang K, Zhu ZQ, Ombach G. Torque enhancement of surface-mounted permanent magnet machine using third-order harmonic. *IEEE Trans Magn* 2014;50(3):104–13
76. Bafghi B., Vahedi A. A Comparison of Electric Motors for Electrical Submersible Pumps Used in the Oil and Gas Industry. *Proc. 2nd International Conference on Engineering Sciences. 2nd International Conference on Engineering Sciences*. Kerbala, Iraq, March 26-27, 2018. Vol. 433. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/>

77. Головань, І. В., Попович, О. М., & Поліщук, В. О. (2022). Засоби проектного синтезу занурених асинхронних двигунів інноваційних конструкцій. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, (63), 40-44. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.040>
78. Somaloy, powders for electromagnetic applications. URL: <https://www.hoganas.com/en/powdertechologies/>
79. Aarniovuori L, Kärkkäinen H, Anuchin A, Pyrhönen JJ, Lindh P, Cao W. Voltage source converter energy efficiency classification in accordance with IEC 61800-9-2. IEEE Trans Ind Electron 2020;67(10):8242–51.
80. Qi X, Holtz J. Modeling and control of low switching frequency high-performance induction motor drives. IEEE Trans Ind Electron 2020;67(6):4402–10.
81. Bajjuri NK, Jain AK. Minimization of current ripple and switching losses in double inverter fed wound rotor induction machine drive using PWM techniques. IEEE Trans Ind Electron 2020;67(5):3484–95.
82. Kumar R, Kumar P, Kanekawa T, Oishi K. Stray loss model for induction motors with using equivalent circuit parameters. IEEE Trans Energy Convers 2020;35(2):1036–45.
83. Dems M, Komezka K, Majer K. Core losses of the induction motor operating in a wide frequency range supplied from the inverter. Int J Appl Electromagn Mech 2021;64(1):S65–82.
84. Ravanji MH, Cañizares CA, Parniani M. Modeling and control of variable speed\ wind turbine generators for frequency regulation. IEEE Trans Sustain Energy 2020;11(2):916–27.
85. Ferreira FJTE, Alberto J, Silva AM, de Almeida AT. Saturation-related losses in induction motors for star and delta connection modes. In: International conference on electrical machines. ICEM, 2020, p. 1586–93.
86. Gmyrek Z, Vaschetto S, Darmani MA, Cavagnino A. Noninvasive measurements and FEM analyses for estimating the rotor bar-lamination contact resistance. IEEE Trans Ind Appl 2021;57(1):208–17.

87. Carbonieri M, Bianchi N. Induction motor rotor losses analysis methods using finite element. In: IEEE international conference on industrial technology. ICIT, 2020, p. 187–92.
88. Hwang SW, Kim JH, Ahn DG, Lim MS. Improved equivalent circuit of induction motor considering iron-loss calculated by novel analysis method for flux density harmonics. In: International conference on electrical machines. ICEM, 2020, p. 894–900.
89. Chuan H, Gan L. Investigation of the power losses in induction machines with rotor eccentricity. *Electr Eng* 2020;102(3):1393–403.
90. Nobile G, Scelba G, Cacciato M, Scarcella G. Losses minimization control for an integrated multidrive topology devoted to hybrid electric vehicles. *IEEE Trans Ind Electron* 2019;66(11):8345–60.
91. Mizukoshi A, Haga H. Reduction of voltage harmonics in an open-end winding induction motor driven by a dual-inverter with floating-capacitor in the low-speed region. In: 2020 12th annual IEEE energy conversion congress and exposition (IEEE ECCE). 2020, p. 2656–61.
92. Esen GK, Özdemir E. A new field test method for determining energy efficiency of induction motor. *IEEE Trans Instrum Meas* 2017;66(12):3170–9.
93. Karkkainen H, Aarniovuori L, Niemela M, Pyrhonen J. Converter-fed induction motor efficiency: practical applicability of IEC methods. *IEEE Ind Electron Mag* 2017;11(2):45–57.
94. McElveen R, Melfi M, McFarland J. Improved characterization of polyphase induction motor losses: test standards must be modified to improve efficiency optimization. *IEEE Ind Appl Mag* 2019;25(6):61–8.
95. Aminu Muhammad, Mushenya John, Barendse Paul S, Khan Mohamed A. Converter-fed induction motor efficiency measurement under variable frequency/load points: an extension of the IEC/TS 60034-2-3. In: IEEE energy conversion congress and exposition. 2019.
96. Agamloh EB, Cavagnino A, Vaschetto S. Standard efficiency determination of induction motors with a PWM inverter source. *IEEE Trans Ind Appl* 2019;55(1):398–406.

97. Gnacinski P, Peplinski M, Hallmann D. Power losses and windings temperature of an induction machine under voltage subharmonics. *Sci J Maritime Univ Szczecin-Zeszyty Naukowe Akad Morskiej Szczecinie* 2020;63(135):51–7.
98. Malekpour M, Azizipanah-Abarghooee R, Teng F, Strbac G, Terzija V. Fast frequency response from smart induction motor variable speed drives. *IEEE Trans Power Syst* 2020;35(2):997–1008.
99. Li M, An YJ, Zhang ZH, Deng WY, Wang GY, Qi LJ, Kong XL, Bi DL, Shi Y, Zhu S. Effect of time harmonic current considering load condition on performance of canned induction motor. *Int J Appl Electromagn Mech* 2021;66(3):369–85.
100. He Jiangbiao, Li Cong, Jassal Anoop, Thiagarajan Naveenan, Zhang Yichao, Prabhakaran Satish, Feliz Carlos, Graham James E, Kang Xiaosong. Multi-domain design optimization of dv/dt filter for SiC-based three-phase inverters in high-frequency motor-drive applications. *IEEE Trans Ind Appl* 2019;55(5):5214–22.
101. Eftekhari SR, Davari SA, Naderi P, Garcia C, Rodriguez J. Robust loss minimization for predictive direct torque and flux control of an induction motor with electrical circuit model. *IEEE Trans Power Electron* 2020;35(5):5417–26.
102. Kabir MA, Jaffar MZM, Wan Z, Husain I. Design, optimization, and experimental evaluation of multilayer AC winding for induction machine. *IEEE Trans Ind Appl* 2019;55(4):3630–9.
103. Mushenya J, Khan MA, Barendse PS. Development of a test rig to automate efficiency testing of converter-fed induction motors. *IEEE Trans Ind Appl* 2019;55(6):5916–24.
104. Zhang D, Liu T, Zhao H, Wu T. N analytical iron loss calculation model of inverter-fed induction motors considering supply and slot harmonics. *IEEE Trans Ind Electron* 2019;66(12):9194–204.
105. Sabariego RV, Niyomsatian K, Gyselinck J. Eddy-current-effect homogenization of windings in harmonic-balance finite-element models coupled to nonlinear circuits. *IEEE Trans Magn* 2018;54(3):1–4.
106. Igarashi H. Semi-analytical approach for finite-element analysis of multi-turn coil considering skin and proximity effects. *IEEE Trans Magn* 2017;53(1):1–7.

107. Jiang, M., Tian, J., Goh, H. H., Yi, J., Li, S., Zhang, D., & Wu, T. (2022). Experimental study on the influence of high frequency PWM harmonics on the losses of induction motor. *Energy Reports*, 8, 332-342. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.158>
108. Marks S., Dach J., Fernandez M. F. J., Mazurkiewicz J., Pochwatka P., Gierz Ł. New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21. № 4. P. 19–25. DOI: 10.12911/22998993/119528 11.
109. Червоний І. Ф., Куріс Ю. В. Дослідження пристроїв та удосконалення процесів перемішування в біогазових установках. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2012. № 2. С. 96.
110. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 4(52). Кременчук, 2020. – 17-26 с. DOI: 10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26.
111. Rozov, V. Yu, et al. "Магнітне поле кабельних систем електрообігріву підлог житлових приміщень. *Electrical Engineering & Electromechanics* 5 (2024): 48-57 <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.07>
112. M. Zablodskiy, V. Kozyrskiy, A. Zhylytsov, V. Savchenko, O. Sinyavsky, M. Spodoba, P. Klendiy, G. Klendiy, "Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field." In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv: IEEE. 2020, pp. 530-535. <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088763>.
113. Haritwal, Anurag, et al. "Study on the improved biogas generation through magnetic field modified anaerobic digestion." *Int. J. Eng. Res. Technol* 4 (2015): 1175-1179.
114. Benyoucef, Nabil, et al. "Enhancement of the denitrification performance of an activated sludge using an electromagnetic field in batch mode." *Chemosphere* 262 (2021): 127698. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127698>
115. Rathore, Anurag S., Lalita Kanwar Shekhawat, and Varun Loomba. "Computational fluid dynamics for bioreactor design." *Bioreactors: Design, Operation and Novel Applications* (2016): 295-322. doi:10.1002/9783527683369.ch10.

116. Verma, R., Mehan, L., Kumar, R., Kumar, A., Srivastava, A. (2019). Computational fluid dynamic analysis of hydrodynamic shear stress generated by different impeller combinations in stirred bioreactor. *Biochem Eng J.* p. 151. doi: 10.1016/j.bej.2019.107312.
117. Toyota, E., Kawahara, N., & Azimov, U. (2022). *Biogas combustion engines for green energy generation.* Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
118. Martin, Buhmann, M. J. Buhmann, and J. Ablowitz. "Radial basis functions: theory and implementations." Cambridge University (ISBN: 0-521-63338-9.) (2003): 5.
119. Кобушко І. М., Нємцева С. П. Методи оцінки ефективності інвестицій в залежності від виду інвестиційного проекту. *Інвестиції: практика та досвід.* 2014. № 22. С. 20–24.
120. Поліщук В. М., Дубровін В. О., Поліщук О. В. Енергетичний баланс метантенка біогазової установки ВП НУБіП України "Агрономічна дослідна станція". С. 114-123.
121. Економіка підприємства : підручник / Г. О. Швиданенко, В. Г. Васильков, Н. П. Гончарова та ін.; за заг. та наук. ред. Г. О. Швиданенко. Київ : КНЕУ, 2009. 598 с.
122. M. Zablodskiy et al., "Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field," 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 530-535, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088763.

ДОДАТКИ

Програмне забезпечення симісторного регулятора напруги, яке побудоване на принципах неблокуючої архітектури

```

=====
// ТРИФАЗНИЙ СИМИСТРОРНИЙ РЕГУЛЯТОР НА ESP32-S2
// =====

#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <GyverOLED.h>
#include <EncButton.h>
#include "esp_timer.h"

// ===== НАЛАШТУВАННЯ (МОЖНА ЗМІНЮВАТИ) =====
#define TRIAC_PULSE_US 100 // Час утримання симістора відкритим (мікросекунди)
#define ZC_DEBOUNCE_MS 8 // Захист від завад детектора нуля (мілісекунди)

// Зсув маски 10 Гц для фаз (імітація кута 120 та 240 градусів)
#define OFFSET_L1 0
#define OFFSET_L2 3
#define OFFSET_L3 7

// ===== ПІНИ ПІДКЛЮЧЕННЯ =====
#define PIN_ENC_A 3
#define PIN_ENC_B 5
#define PIN_ENC_BTN 7

#define PIN_I2C_SDA 8
#define PIN_I2C_SCL 9

#define PIN_ZC_L1 35
#define PIN_ZC_L2 36
#define PIN_ZC_L3 34

#define PIN_TRIAC_L1 33
#define PIN_TRIAC_L2 37
#define PIN_TRIAC_L3 38

// ===== ГЛОБАЛЬНІ ЗМІННІ ДИМЕРА =====
bool isDeviceOn = false; // Глобальний стан (Ввімкнено/Вимкнено)
float targetDuty = 0.0; // Цільове заповнення (0.0 - 100.0%)
float currentDuty = 0.0; // Поточне заповнення
int softStartTime = 3; // Час пуску (секунди)
int softStopTime = 3; // Час зупинки (секунди)
bool useSoftStart = true; // Вкл/викл плавного пуску
bool useSoftStop = true; // Вкл/викл плавного стопу
int frequency = 50; // Частота (50 або 10)

// Маска для 10 Гц

```

```

const uint8_t mask10Hz[10] = {1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0};
volatile uint8_t counterL1 = 0;
volatile uint8_t counterL2 = 0;
volatile uint8_t counterL3 = 0;

volatile uint32_t lastZcL1 = 0;
volatile uint32_t lastZcL2 = 0;
volatile uint32_t lastZcL3 = 0;

// ===== СТАН МЕНЮ =====
int menuCursor = 0;
bool isEditing = false;
bool needDisplayUpdate = true;
uint32_t lastScreenUpdate = 0;

// ===== ОБ'ЄКТИ =====
EncButton eb(PIN_ENC_A, PIN_ENC_B, PIN_ENC_BTN);
GyverOLED<SSD1306_128x64, OLED_BUFFER> oled;

esp_timer_handle_t timerL1, timerL2, timerL3;

// ===== БЛОК 1: ОБРОБНИКИ ТАЙМЕРІВ СИМІСТОРІВ =====
void IRAM_ATTR fireTriacL1(void* arg) {
    digitalWrite(PIN_TRIAC_L1, HIGH);
    esp_rom_delay_us(TRIAC_PULSE_US);
    digitalWrite(PIN_TRIAC_L1, LOW);
}

void IRAM_ATTR fireTriacL2(void* arg) {
    digitalWrite(PIN_TRIAC_L2, HIGH);
    esp_rom_delay_us(TRIAC_PULSE_US);
    digitalWrite(PIN_TRIAC_L2, LOW);
}

void IRAM_ATTR fireTriacL3(void* arg) {
    digitalWrite(PIN_TRIAC_L3, HIGH);
    esp_rom_delay_us(TRIAC_PULSE_US);
    digitalWrite(PIN_TRIAC_L3, LOW);
}

// ===== БЛОК 2: ПЕРЕРИВАННЯ ДЕТЕКТОРІВ НУЛЯ =====
void IRAM_ATTR zc_isr_L1() {
    uint32_t now = millis();
    if (now - lastZcL1 < ZC_DEBOUNCE_MS) return;
    lastZcL1 = now;

    counterL1 = (counterL1 + 1) % 10;
    if (counterL1 == 0) { counterL2 = 0; counterL3 = 0; }

    if (currentDuty <= 0.1) return; // ПОВНЕ ВИМКНЕННЯ

```

```

    if (frequency == 10 && mask10Hz[(counterL1 + OFFSET_L1) % 10] == 0) return;

    uint64_t delay_us = 9500 - (currentDuty * 90.0);
    esp_timer_start_once(timerL1, delay_us);
}

void IRAM_ATTR zc_isr_L2() {
    uint32_t now = millis();
    if (now - lastZcL2 < ZC_DEBOUNCE_MS) return;
    lastZcL2 = now;
    counterL2 = (counterL2 + 1) % 10;

    if (currentDuty <= 0.1) return;
    if (frequency == 10 && mask10Hz[(counterL2 + OFFSET_L2) % 10] == 0) return;

    uint64_t delay_us = 9500 - (currentDuty * 90.0);
    esp_timer_start_once(timerL2, delay_us);
}

void IRAM_ATTR zc_isr_L3() {
    uint32_t now = millis();
    if (now - lastZcL3 < ZC_DEBOUNCE_MS) return;
    lastZcL3 = now;
    counterL3 = (counterL3 + 1) % 10;

    if (currentDuty <= 0.1) return;
    if (frequency == 10 && mask10Hz[(counterL3 + OFFSET_L3) % 10] == 0) return;

    uint64_t delay_us = 9500 - (currentDuty * 90.0);
    esp_timer_start_once(timerL3, delay_us);
}

// ===== БЛОК 3: ПЕРЕРИВАННЯ ЕНКОДЕРА =====
void IRAM_ATTR encISR() {
    eb.tickISR(); // Апаратне опитування енкодера (ніколи не пропустить крок)
}

// ===== БЛОК 4: ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ (SETUP) =====
void setup() {
    pinMode(PIN_TRIAC_L1, OUTPUT); digitalWrite(PIN_TRIAC_L1, LOW);
    pinMode(PIN_TRIAC_L2, OUTPUT); digitalWrite(PIN_TRIAC_L2, LOW);
    pinMode(PIN_TRIAC_L3, OUTPUT); digitalWrite(PIN_TRIAC_L3, LOW);

    pinMode(PIN_ZC_L1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(PIN_ZC_L2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(PIN_ZC_L3, INPUT_PULLUP);

    // Прив'язка апаратних переривань для енкодера
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ENC_A), encISR, CHANGE);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ENC_B), encISR, CHANGE);
}

```

```

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ENC_BTN), encISR, CHANGE);

Wire.begin(PIN_I2C_SDA, PIN_I2C_SCL);
Wire.setClock(400000L);
oled.init();
oled.clear(); oled.update();

esp_timer_create_args_t timer_args_L1 = { .callback = &fireTriacL1, .name =
"triacL1" };
esp_timer_create_args_t timer_args_L2 = { .callback = &fireTriacL2, .name =
"triacL2" };
esp_timer_create_args_t timer_args_L3 = { .callback = &fireTriacL3, .name =
"triacL3" };

esp_timer_create(&timer_args_L1, &timerL1);
esp_timer_create(&timer_args_L2, &timerL2);
esp_timer_create(&timer_args_L3, &timerL3);

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ZC_L1), zc_isr_L1, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ZC_L2), zc_isr_L2, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ZC_L3), zc_isr_L3, RISING);
}

// ===== БЛОК 5: ОБРОБКА ДИСПЛЕЯ =====
void updateDisplay() {
oled.clear();
oled.home();
oled.setScale(1);

const char* menuItems[] = {
    "1. Power:",
    "2. Duty:",
    "3. Freq:",
    "4. S.Start:",
    "5. S.Stop:",
    "6. S.Time:"
};

for (int i = 0; i < 6; i++) {
oled.print((i == menuCursor) ? (isEditing ? "=> " : "> ") : " ");
oled.print(menuItems[i]);

if (i == 0) {
oled.println(isDeviceOn ? " ON" : " OFF");
} else if (i == 1) {
oled.print(" "); oled.print(targetDuty, 1); oled.println(" %");
} else if (i == 2) {
oled.print(" "); oled.print(frequency); oled.println(" Hz");
} else if (i == 3) {
oled.println(useSoftStart ? " ON" : " OFF");
}
}
}

```

```

    } else if (i == 4) {
        oled.println(useSoftStop ? " ON" : " OFF");
    } else if (i == 5) {
        oled.print(" "); oled.print(softStartTime); oled.println(" s");
    }
}

oled.setCursor(0, 55);
oled.print("Real out: "); oled.print(currentDuty, 1); oled.print("%");
oled.update();
}

// ===== БЛОК 6: ЛОГІКА ПЛАВНОГО ПУСКУ/ЗУПИНКИ =====
void handleDimmerLogic() {
    static uint32_t lastRampUpdate = 0;
    if (millis() - lastRampUpdate >= 10) {
        lastRampUpdate = millis();

        // Лінійний розрахунок кроку
        float stepStart = 100.0 / (softStartTime * 100.0);
        float stepStop = 100.0 / (softStopTime * 100.0);

        if (isDeviceOn) {
            if (currentDuty < targetDuty) {
                currentDuty += (useSoftStart && softStartTime > 0) ? stepStart : 100.0;
                if (currentDuty > targetDuty) currentDuty = targetDuty;
                needDisplayUpdate = true;
            } else if (currentDuty > targetDuty) {
                currentDuty = targetDuty;
                needDisplayUpdate = true;
            }
        } else {
            if (currentDuty > 0) {
                currentDuty -= (useSoftStop && softStopTime > 0) ? stepStop : 100.0;
                if (currentDuty <= 0.1) currentDuty = 0.0; // Гарантований нуль
                needDisplayUpdate = true;
            }
        }
    }
}

// ===== БЛОК 7: ОСНОВНИЙ ЦИКЛ (LOOP) =====
void loop() {
    eb.tick(); // Обробка прапорців від переривань

    // ПОТРІЙНИЙ КЛІК: Увімкнення/Вимкнення з будь-якого місця
    if (eb.hasClicks(3)) {
        isDeviceOn = !isDeviceOn;
        needDisplayUpdate = true;
        lastScreenUpdate = 0; // Миттєве оновлення екрану
    }
}

```

```

}
// ОДИНАРНИЙ КЛІК
else if (eb.hasClicks(1)) {
    if (menuCursor != 1) {
        isEditing = !isEditing;
        needDisplayUpdate = true;
        lastScreenUpdate = 0;
    }
}

// ОБЕРТАННЯ З ЗАТИСНЕНОЮ КНОПКОЮ (Зміна Duty)
if (menuCursor == 1 && eb.pressing() && eb.turn()) {
    // Швидке обертання: крок 1.0%, Повільне: крок 0.1%
    float step = eb.fast() ? 1.0 : 0.1;
    targetDuty += step * eb.dir();

    if (targetDuty > 100.0) targetDuty = 100.0;
    if (targetDuty < 0.0) targetDuty = 0.0;

    needDisplayUpdate = true;
    lastScreenUpdate = 0;
}

// ЗВИЧАЙНЕ ОБЕРТАННЯ
else if (eb.turn()) {
    if (!isEditing) {
        menuCursor += eb.dir();
        if (menuCursor < 0) menuCursor = 5;
        if (menuCursor > 5) menuCursor = 0;
    } else {
        switch (menuCursor) {
            case 0:
                isDeviceOn = !isDeviceOn;
                break;
            case 2:
                if (!isDeviceOn) frequency = (frequency == 50) ? 10 : 50;
                break;
            case 3:
                if (!isDeviceOn) useSoftStart = !useSoftStart;
                break;
            case 4:
                if (!isDeviceOn) useSoftStop = !useSoftStop;
                break;
            case 5:
                softStartTime += eb.fast() ? 5 * eb.dir() : 1 * eb.dir();
                if (softStartTime < 1) softStartTime = 1;
                if (softStartTime > 30) softStartTime = 30;
                softStopTime = softStartTime;
                break;
        }
    }
}
}

```

```
    needDisplayUpdate = true;  
    lastScreenUpdate = 0; // Миттєве оновлення екрану  
}
```

```
handleDimmerLogic();
```

```
if (needDisplayUpdate && (millis() - lastScreenUpdate > 50)) {  
    updateDisplay();  
    needDisplayUpdate = false;  
    lastScreenUpdate = millis();  
}
```

```
}
```

Джерело: розроблено автором

Програма та методика проведення комплексних експериментальних досліджень електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора

Головною метою проведення експериментальних досліджень є фізична верифікація теоретичних положень, підтвердження адекватності розроблених математичних моделей електромагнітних, теплових та гідродинамічних процесів, а також оцінка реальної енергетичної ефективності та робочих характеристик розробленого електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора.

Для досягнення поставленої мети було розроблено комплексну програму експериментальних досліджень, яка передбачає вирішення таких завдань:

- Перевірка працездатності та оцінка метрологічних характеристик створеного апаратно-програмного комплексу збору даних в умовах реальних електромагнітних завад.

- Дослідження гідродинамічних характеристик системи автоматичного очищення сенсорів (визначення навантажувальних характеристик помпи та параметрів факела розпилення).

- Дослідження теплових, електричних та механічних характеристик заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП) при різних топологіях систем живлення (перетворювач частоти, симісторний регулятор, автотрансформатор).

- Оцінка ефективності роботи системи безконтактної передачі енергії (повітряного обертового трансформатора) в динамічних режимах.

- Аналіз загальної енергоефективності комплексу та узгодженості роботи всіх його підсистем.

Об'єктом експериментального дослідження є фізичний макет електротехнічного комплексу, який включає заглибний ПЕМП, пристрій автоматичного контролю параметрів (ПАК) та розроблену систему керування і моніторингу.

Для проведення випробувань було змонтовано лабораторний експериментальний стенд. З метою стандартизації результатів та унеможливлення впливу нестабільних біологічних факторів на етапі базових теплотехнічних та електромеханічних випробувань як імітатор біогазового субстрату використовувалася вода. Об'єм робочої рідини в експериментальному резервуарі

становив 150 літрів. Використання води як еталонної ньютонівської рідини з відомими теплоємністю та в'язкістю дозволяє найбільш точно верифікувати процеси тепломасообміну, генерації тепла ротором та гідродинаміки перемішування, перш ніж переходити до досліджень реальних неньютонівських біосубстратів.



Фундаментальною особливістю запропонованої методики є те, що весь масив експериментальних даних збирався виключно за допомогою розробленого апаратно-програмного комплексу (описаного у Розділі 3). До складу вимірювальної інфраструктури входили:

- Модулі PZEM-004T для фіксації фазних напруг U , струмів I , активної потужності P та $\cos \varphi$.
- Масив із 16 цифрових датчиків температури DS18B20 для просторового моніторингу нагріву ротора, обмоток статора та температури робочої рідини (води).
- Цифровий датчик Холла (A3144) для визначення частоти обертання ПЕМП.
- Датчики температури та вологості АНТ10 для контролю мікроклімату в повітряному зазорі.

Зовнішні лабораторні контрольні-вимірювальні прилади використовувалися виключно на етапі налаштування стенда як еталонні засоби для перевірки точності та калібрування розробленої системи.

Відповідно до розробленої програми, найбільш масштабним етапом було дослідження енергетичної та теплової поведінки ПЕМП при різних топологіях регулювання напруги. Дослідження проводилися за трьома сценаріями:

- Живлення від векторного перетворювача частоти (ПЧ). Мета – оцінка ефективності ПЕМП в режимах із низькою частотою живлення. Згідно з теоретичною гіпотезою, при законі керування $U/f = \text{const}$, зниження частоти призводить до різкого зменшення напруги, але струм залишається значним. Це спричиняє інтенсивний нагрів статорних обмоток, тоді як вихрові струми у феромагнітному роторі індуються слабо, що робить цей режим енергетично неефективним для підігріву реактора.

- Живлення від симісторного регулятора напруги. Мета – дослідження впливу фазового регулювання (зрізу синусоїди) на тепловиділення. Очікувалося, що наявність вищих гармонік та жорстких фронтів напруги максимально інтенсифікує протікання вихрових струмів Фуко в масиві ротора, забезпечуючи найшвидший нагрів рідини. Побічним ефектом, що підлягав контролю, була оцінка рівня механічної вібрації, викликаній несинусоїдальністю магнітного потоку.

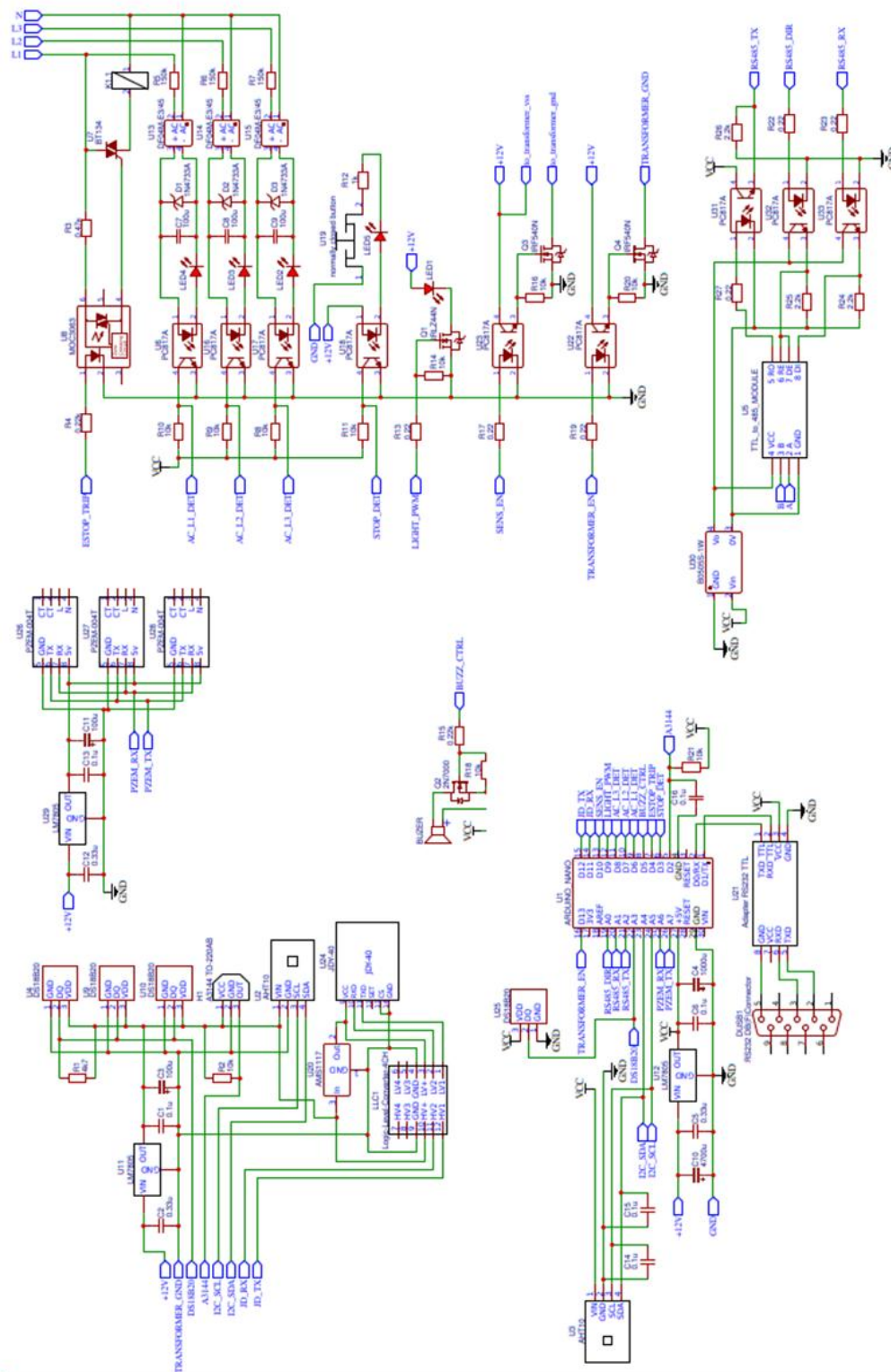
- Живлення через трифазний автотрансформатор. Мета – фіксація робочих параметрів ПЕМП при живленні чистою синусоїдальною напругою зі зниженою амплітудою. Даний режим розглядався як еталонний для забезпечення плавної роботи агрегату без перегріву обмоток та вібрацій, хоча й з меншою тепловою потужністю ротора.

Тривалість експериментів: З огляду на об'єктивні зовнішні фактори (нестабільність електромережі та ризики раптових відключень електроенергії), а також з наукової доцільності, тривалість одного циклу вимірювань для теплових режимів становила від 12 до 18 хвилин. Завданням експерименту було не досягнення максимальних сталих температур (що для 150 л води вимагало б годин роботи), а фіксація динаміки перехідних процесів. Аналіз похідних (градієнтів) зростання температури води та обмоток у часі за перші 15 хвилин є математично достатнім для побудови теплової моделі та порівняльної оцінки ефективності нагрівальних властивостей трьох різних джерел живлення.

Дослідження підсистеми розпилення проводилося за спеціально розробленою методикою [35]. Для реєстрації швидких перехідних процесів тиску та струму помпи використовувався автоматичний реєстратор на базі Arduino Nano з модулем INA219 із частотою дискретизації 120 Гц. Для визначення площі покриття та форми конуса розпилення використовувався гофрований стіл-колектор з набором мірних ємностей для збору розпорошеної рідини, що дозволило експериментально верифікувати результати попереднього CFD-моделювання.

Обробка отриманих масивів експериментальних даних здійснювалася методами математичної статистики та регресійного аналізу з використанням спеціалізованого програмного забезпечення на ПК.

Принципова електрична схема розробленого електротехнічного комплексу



Джерело: розроблено автором.

Програмне забезпечення розробленого електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора

```

#define L1_pin 6
#define L2_pin 7
#define L3_pin 8
#define Stop_pin 3
#define EStop_pin 4
#define SEnable_pin 10
#define PZEM_RX_PIN A6
#define PZEM_TX_PIN A7
#define T_EN_PIN 13
#define BUZ_PIN 5
#define MAX485_DE_RE A0
#define RX_PIN A2
#define TX_PIN A1
#define LED_PIN 9
#define DS_PIN A3
#define HOLLA_PIN 2

#define MAX_FREQ_VFD 50.0 // Максимальна частота в частотнику
#define FADE_SPEED 5 // Швидкість плавності LED (Менше число = швидше, Більше
число = повільніше)
#define DEBOUNCE_TIME 200000

#include <Arduino.h>
#include <EEPROM.h>
#include <Wire.h>
#include <AHTxx.h>
#include <PZEM004Tv30.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <ModbusMaster.h>
#include <OneWire.h>

struct SettingsData { // Налаштування
    uint16_t header = 0xABC0;
    uint32_t time = 0;
    uint16_t T_air_out = 30000; // Таймер вимірювання температури повітря зовні
    uint16_t T_air_in = 29000; // Таймер вимірювання температури повітря всередині
    uint16_t T_temp_anchor = 7000; // Таймер вимірювання температури обмоток якоря
    uint16_t T_temp_water = 20000; // Таймер вимірювання температури води
    uint16_t T_temp_rotor = 5000; // Таймер вимірювання температури ротора
    uint16_t T_rpm = 1000; // Таймер вимірювання обертів
    uint16_t T_pzems = 3000; // Таймер опитування PZEM (напруга, струм, тощо)
    uint16_t T_converter = 5000; // Таймер опитування частотного перетворювача
    float C_pzem_u[3] = {1.0, 1.0, 1.0}; // Калібрувальний коефіцієнт PZEM U
    float C_pzem_i[3] = {1.0, 1.0, 1.0}; // Калібрувальний коефіцієнт PZEM I
    uint8_t crc; // Контрольна сума
} Settings;

```

```

struct AhtInPacket { // Температура повітря всередині
    uint16_t header = 0xABC5;
    uint32_t time = 0;
    float temp = 0;
    int16_t moisture = 0;
    uint8_t crc;
} AntIn;
struct AhtOutPacket { // Температура повітря зовні
    uint16_t header = 0xABC6;
    uint32_t time = 0;
    float temp = 0;
    int16_t moisture = 0;
    uint8_t crc;
} AntOut;
struct PZEMSPacket { // Дані з PZEM
    uint16_t header = 0xABC7;
    uint32_t time = 0;
    float U[3] = {0};
    float I[3] = {0};
    float P[3] = {0};
    float HZ[3] = {0};
    float PF[3] = {0};
    uint8_t crc;
} PZEMSdata;
struct RotorTempPacket { // Температура корпусу
    uint16_t header = 0xABC1; // Заголовок вже виставлений
    uint32_t time = 0; // Час будемо оновлювати
    int16_t data[13]; // Сюди писатимемо дані прямо з Serial
    uint8_t crc; // Тут буде CRC *нового* пакету
} RotorTempData;
struct ConverterPacket { // Дані з частотника
    uint16_t header = 0xABC8;
    uint32_t time = 0;
    float voltage = 0;
    float current = 0;
    float frequency = 0;
    uint8_t crc;
} ConverterData;
struct RotorWindingsPacket { // Температура обмоток
    uint16_t header = 0xABC2;
    uint32_t time = 0;
    float temp[3] = {0};
    uint8_t crc;
} RotorWindingsData;
struct WaterTempPacket { // Температура води
    uint16_t header = 0xABC3;
    uint32_t time = 0;
    float temp = 0;
    uint8_t crc;
} WaterTempData;

```

```

struct RpmPacket { // Оберти
    uint16_t header = 0xABC4;
    uint32_t time = 0;
    uint16_t rpm = 0;
    uint8_t crc;
} RpmData;
struct PacketData { // Дані на приймання 1
    uint16_t header; // 2 байти
    int16_t data[9]; // 18 байтів (data[0]..data[7])
    uint8_t crc; // 1 байт
} __attribute__((packed));
union Packet { // Дані на приймання 2
    PacketData structure;
    uint8_t raw[sizeof(PacketData)];
} rxPacket;

// --- MODBUS АДРЕСИ ---
const uint16_t REG_CONTROL = 0x2000;
const uint16_t REG_FREQ_SET = 0x2001;
const uint16_t REG_MONITOR_START = 0x2103;

// --- КОМАНДИ MODBUS ---
const uint16_t CMD_STOP = 0x0001;
const uint16_t CMD_FWD = 0x0012;
const uint16_t CMD_REV = 0x0022;

// Тайм-аут для визначення зупинки.
// 20 об/хв = 1 імпульс раз на 3 сек. Беремо запас 4 сек.
const uint32_t STOP_TIMEOUT_US = 4000000;

// --- ЗМІННІ ПЕРЕРИВАННЯ ---
volatile uint32_t _isrLastTime = 0;
volatile uint32_t _isrInterval = 0;
volatile bool _isrNewPulse = false;

uint8_t bufIdx = 0; // Змінна для приймання з Serial

// Адреси датчиків DS
uint64_t addrRotor[3] = { // Обмотки
    0x51C4FCF935646128,
    0x1F2A0BFB35646128,
    0x19A6FEF935646128
};
uint64_t addrWater = 0x024AEDD4467E2A28; // Води

AHTxx ant_i(AHTXX_ADDRESS_X38, AHT1x_SENSOR);
AHTxx ant_o(AHT10_ADDRESS_X39, AHT1x_SENSOR);
PZEM004Tv30 pzems[3];
SoftwareSerial pzemSWSerial(PZEM_RX_PIN, PZEM_TX_PIN);
SoftwareSerial mySerial(RX_PIN, TX_PIN);

```

```

ModbusMaster node;
OneWire ds(DS_PIN);

uint8_t crc8(const void* data, size_t length, uint8_t crc = 0) { // функція розрахунку
контрольної суми CRC
    const uint8_t* p = (const uint8_t*)data;
    while (length--) {
        uint8_t b = *p++, j = 8;
        while (j--) {
            crc = ((crc ^ b) & 1) ? (crc >> 1) ^ 0x8C : (crc >> 1);
            b >>= 1;
        }
    }
    return crc;
}

void setup() {
    InitEEPROM();
    InitPINS();
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(HOLLA_PIN), sensHolla, FALLING);
    digitalWrite(SEnable_pin, HIGH); // Ввімкнення живлення на датчики та телеметрію в
роторі
    InitANT();
    InitPZEMS();
    InitConverter();
    TCCR1B = (TCCR1B & 0xF8) | 0x01;
    EEPROM.get(0, Settings); // Отримання налаштувань з пам'яті
    Serial.begin(115200);
    Serial1.begin(9600);
}

void loop() {
    Detector(); // Перевірка наявності напруги на частотному перетворювачеві
    AhtRead(); // Опитування АНТ10 Зовні\всередені
    ReadPZEMS(); // Опитування PZEM
    ReadSensorRotor(); // Опитування датчиків температури корпусу
    BuzzControl(0); // Керування пищалкою
    ConverterControl(0, 0); // Керування частотним перетворювачем
    LedControl(-1); // Керування LED
    DSTempControl(); // Опитування DS18B20
    RpmControl(); // Опитування тахометра
    ReadPCSerial(); // Приймання команд з Serial
}

void InitEEPROM() { // Перший запуск, ініціалізація EEPROM
    if (EEPROM.read(1023) != 65) {
        EEPROM.write(1023, 50);
        EEPROM.put(0, Settings);
    }
}
}

```

```

void InitPINS() { // Ініціалізація ніг контроллера
  pinMode(L1_pin, INPUT);
  pinMode(L2_pin, INPUT);
  pinMode(L3_pin, INPUT);
  pinMode(Stop_pin, INPUT);
  pinMode(EStop_pin, OUTPUT);
  pinMode(SEnable_pin, OUTPUT);
  pinMode(T_EN_PIN, OUTPUT);
  pinMode(BUZ_PIN, OUTPUT);
  pinMode(MAX485_DE_RE, OUTPUT);
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
  pinMode(HOLLA_PIN, INPUT_PULLUP);
}
void InitANT() { // Ініціалізація AHT10
  Wire.begin(); // Запуск I2C
  Wire.setClock(1000); // Встановлення частоти I2C
  ant_o.begin();
  ant_i.begin();
}
void InitPZEMS() { // Ініціалізація PZEMS
  for(int i = 0; i < 3; i++) {
    pzems[i] = PZEM004Tv30(pzemSWSerial, 0x0A + i);
  }
}
void InitConverter() { // Ініціалізація частотного перетворювача
  digitalWrite(MAX485_DE_RE, LOW);
  mySerial.begin(9600);
  node.begin(1, mySerial);
  node.preTransmission(preTransmission);
  node.postTransmission(postTransmission);
}
void Detector() { // Перевірка наявності напруги та натиснутої кнопки стоп
  if (digitalRead(L1_pin) == 1 || digitalRead(L2_pin) == 1 || digitalRead(L3_pin) == 1
  || digitalRead(Stop_pin) == 1) {
    PowerOFF();
  }
}
void PowerOFF() { // Аварійне вимкнення напруги на частотному
перетворювачеві
  static uint32_t T_estop;
  if (millis() - T_estop >= 1000) {
    T_estop = millis();
    //BuzzControl(4);
    //digitalWrite(EStop_pin, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(EStop_pin, LOW);
  }
}
void AhtRead() { // Читання датчиків температури повітря
  static uint32_t T_aht_in, T_aht_out;
}

```

```

if (millis() - T_ah_t_in >= Settings.T_air_in) {
    T_ah_t_in = millis();
    AntIn.time = millis();
    AntIn.temp = ant_i.readTemperature();
    AntIn.moisture = ant_i.readHumidity();
    if (AntIn.temp != AHTXX_ERROR && AntIn.moisture != AHTXX_ERROR) {
        AntIn.crc = crc8((byte*)&AntIn, sizeof(AntIn) - 1);
        Serial.write((byte*)&AntIn, sizeof(AntIn));
    } else {
        ant_i.softReset();
        delay(100);
        ant_i.begin();
    }
}
if (millis() - T_ah_t_out >= Settings.T_air_out) {
    T_ah_t_out = millis();
    AntOut.time = millis();
    AntOut.temp = ant_o.readTemperature();
    AntOut.moisture = ant_o.readHumidity();
    if (AntOut.temp != AHTXX_ERROR && AntOut.moisture != AHTXX_ERROR) {
        AntOut.crc = crc8((byte*)&AntOut, sizeof(AntOut) - 1);
        Serial.write((byte*)&AntOut, sizeof(AntOut));
    } else {
        ant_o.softReset();
        delay(100);
        ant_o.begin();
    }
}
}
void ReadPZEMS() { // Читання електричних параметрів з PZEMS
    static uint32_t T_pzem;
    if (millis() - T_pzem >= Settings.T_pzems) {
        T_pzem = millis();
        pzemSWSerial.listen();
        for(int i = 0; i < 3; i++){
            PZEMSdata.U[i] = pzem[i].voltage() * Settings.C_pzem_u[i];
            PZEMSdata.I[i] = pzem[i].current() * Settings.C_pzem_i[i];
            PZEMSdata.P[i] = pzem[i].power();
            PZEMSdata.HZ[i] = pzem[i].frequency();
            PZEMSdata.PF[i] = pzem[i].pf();
        }
        PZEMSdata.time = millis();
        PZEMSdata.crc = crc8((byte*)&PZEMSdata, sizeof(PZEMSdata) - 1);
        Serial.write((byte*)&PZEMSdata, sizeof(PZEMSdata));
    }
}
void ReadSensorRotor() { // Читання температури ротора
    static enum { ST_IDLE, ST_WAITING_DATA } state = ST_IDLE;
    static uint32_t timer;
    switch (state) {

```

```

case ST_IDLE:
    if (millis() - timer >= Settings.T_temp_rotor) {
        while(Serial1.available()) Serial1.read(); // Чистимо буфер

        digitalWrite(T_EN_PIN, HIGH);
        timer = millis();
        state = ST_WAITING_DATA;
    }
    break;

case ST_WAITING_DATA:
    if (millis() - timer >= 2000) {
        digitalWrite(T_EN_PIN, LOW);
        state = ST_IDLE;
        timer = millis(); // Скидаємо для наступного циклу
        return;
    }
    // Нам потрібно прийняти 28 байт: 1 (маркер) + 26 (дані) + 1 (crc)
    // sizeof(SensorPacket) = 28. Ми хардкодимо це значення або рахуємо вручну.
    if (Serial1.available() >= 28) {
        // 1. Читаємо Маркер (але не зберігаємо в структуру, він нам не треба)
        byte incomingMarker = Serial1.read();
        if (incomingMarker != 0xFE) {
            return; // Маркер не знайдено, чекаємо далі
        }
        // 2. Читаємо ДАНІ прямо в ЦІЛЬОВУ структуру
        // Ми беремо адресу масиву data всередині структури
        Serial1.readBytes((byte*)RotorTempData.data, sizeof(RotorTempData.data));
        // 3. Читаємо вхідний CRC (в тимчасову змінну)
        byte incomingCRC = Serial1.read();
        // 4. Одразу вимикаємо пін
        digitalWrite(T_EN_PIN, LOW);
        // --- ПЕРЕВІРКА ЦІЛІСНОСТІ (ХИТРИСТЬ) ---
        // CRC рахувався від Маркера + Даних.
        // Дані вже лежать в новій структурі, а маркер у нас окремо.
        // Рахуємо CRC "ланцюжком":
        uint8_t calcCRC = 0;
        calcCRC = crc8(&incomingMarker, 1, calcCRC); // Додаємо маркер
        calcCRC = crc8(RotorTempData.data, sizeof(RotorTempData.data), calcCRC); //
Додаємо дані з структури

        if (incomingCRC == calcCRC) {

            // --- 5. ФІНАЛІЗАЦІЯ НОВОГО ПАКЕТУ ---
            // Тепер, коли дані вірні, оновлюємо поля нової структури
            RotorTempData.time = millis(); // Записуємо поточний час

            // Рахуємо НОВИЙ CRC для нової структури (якщо треба відправляти далі)
            // Рахуємо від header до кінця data (без поля crc)
            // Розмір для CRC: sizeof(RotorTempData) - 1

```

```

    RotorTempData.crc = crc8(&RotorTempData, sizeof(RotorTempData) - 1);

    // ТУТ МОЖНА ВІДПРАВЛЯТИ RotorTempData ДАЛІ
    Serial.write((byte*)&RotorTempData, sizeof(RotorTempData));
}
state = ST_IDLE;
timer = millis();
}
break;
}
}
void BuzzControl(byte cmd) { // Керування звуковим оповіщенням
// Зберігаємо поточні налаштування "між кадрами"
static uint8_t beepsLeft = 0; // Скільки разів залишилось пікнути
static uint16_t timeOn = 0; // Час звуку
static uint16_t timeOff = 0; // Час тиші
static uint32_t timer = 0; // Таймер
static bool isBuzzing = false; // Стан піна (HIGH/LOW)

// --- ЧАСТИНА 1: ЗАВАНТАЖЕННЯ ПРЕСЕТУ ---
if (cmd > 0) {
// Скидаємо поточний стан, щоб новий звук почався миттєво
digitalWrite(BUZ_PIN, LOW);
isBuzzing = false;
timer = millis(); // Старт прямо зараз

switch (cmd) {
case 1: // "Успіх" - один короткий
    beepsLeft = 1; timeOn = 50; timeOff = 0;
    break;
case 2: // "Помилка" - три швидких
    beepsLeft = 3; timeOn = 100; timeOff = 100;
    break;
case 3: // "Довга операція" - два довгих
    beepsLeft = 2; timeOn = 500; timeOff = 300;
    break;
// Додай свої варіанти тут
case 4: // Спрацювання кнопки стоп/ АВАРІЯ
    beepsLeft = 3; timeOn = 1000; timeOff = 500;
    break;
default: // Невідома команда - тиша
    beepsLeft = 0;
    break;
}

// Одразу запускаємо перший "пік", якщо треба
if (beepsLeft > 0) {
    digitalWrite(BUZ_PIN, HIGH);
    isBuzzing = true;
    timer = millis();
}
}
}

```

```

    }
    return; // Виходимо, налаштування завершено
}

// --- ЧАСТИНА 2: ВИКОНАННЯ (Коли cmd == 0) ---
if (beepsLeft > 0) {
    uint32_t now = millis();
    if (isBuzzing) {
        // Зараз пищить. Перевіряємо, чи час вимикати
        if (now - timer >= timeOn) {
            digitalWrite(BUZ_PIN, LOW); // Вимикаємо
            isBuzzing = false;
            timer = now;

            beepsLeft--; // Один "пік" зараховано

            // Якщо це був останній пік, то все, кінець
            if (beepsLeft == 0) {
                // Можна додати логіку завершення, якщо треба
            }
        }
    }
    else {
        // Зараз тиша. Перевіряємо, чи час вмикати знову
        if (now - timer >= timeOff) {
            digitalWrite(BUZ_PIN, HIGH); // Вмикаємо
            isBuzzing = true;
            timer = now;
        }
    }
}
else {
    // На всяк випадок гарантуємо, що пін вимкнений, коли роботи немає
    // (Можна забрати, якщо впевнені в логіці, але це safety net)
    if (digitalRead(BUZ_PIN) == HIGH) digitalWrite(BUZ_PIN, LOW);
}
}

// Керування частотником початок
void preTransmission() {
    digitalWrite(MAX485_DE_RE, HIGH);
}
void postTransmission() {
    digitalWrite(MAX485_DE_RE, LOW);
    delay(2); // ХАК для оптопари
    while (mySerial.available()) mySerial.read(); // Чистка відлуння
}
void ConverterControl(byte cmd, float val) {
    static uint32_t pollTimer = 0;

    // --- 1. ОБРОБКА КОМАНД (Миттєва дія) ---
    if (cmd > 0) {
        uint8_t result;

```

```

mySerial.listen();

switch (cmd) {
    case 1: // Прямий пуск
        result = node.writeSingleRegister(REG_CONTROL, CMD_FWD);
        // Serial.println(result == node.ku8MBSuccess ? "CMD: FWD OK" : "CMD:
FWD Error");
        break;

    case 2: // Реверс
        result = node.writeSingleRegister(REG_CONTROL, CMD_REV);
        // Serial.println(result == node.ku8MBSuccess ? "CMD: REV OK" : "CMD:
REV Error");
        break;

    case 3: // СТОП
        result = node.writeSingleRegister(REG_CONTROL, CMD_STOP);
        // Serial.println(result == node.ku8MBSuccess ? "CMD: STOP OK" : "CMD:
STOP Error");
        break;

    case 4: // Встановлення частоти
        if (val > MAX_FREQ_VFD) val = MAX_FREQ_VFD;
        if (val < 0) val = 0;
        uint16_t rawFreq = (uint16_t)((val / MAX_FREQ_VFD) * 10000);

        result = node.writeSingleRegister(REG_FREQ_SET, rawFreq);
        // if (result == node.ku8MBSuccess) { Serial.print("Freq: ");
Serial.println(val); }
        break;
}

// Після команди бажано скинути таймер опитування, щоб не забивати шину
// або навпаки, опитати одразу (на твій розсуд).
// Тут ми просто даємо паузу перед наступним моніторингом.
pollTimer = millis();
return;
}

// --- 2. ФОНОВЕ ОПИТУВАННЯ (MONITORING) ---
// Виконується тільки якщо cmd == 0
if (millis() - pollTimer >= Settings.T_converter) {
    pollTimer = millis(); // Скидаємо таймер
    mySerial.listen();

    // Читаємо 4 регістри (Частота, Струм, ... , Напруга)
    uint8_t result = node.readHoldingRegisters(REG_MONITOR_START, 4);

    if (result == node.ku8MBSuccess) {
        // Оновлюємо структуру даних

```

```

ConverterData.time = millis();
ConverterData.frequency = node.getResponseBuffer(0) / 100.0; // Freq
ConverterData.current    = node.getResponseBuffer(1) / 10.0; // Current
ConverterData.voltage    = node.getResponseBuffer(3) / 10.0; // Out Voltage
(offset 3)

// Пахуємо CRC (header + time + data)
// sizeof(ConverterData) - 1, бо останній байт це сам crc
ConverterData.crc = crc8(&ConverterData, sizeof(ConverterData) - 1);

// ТУТ МОЖНА ВІДПРАВИТИ ДАНІ, ЯКЩО ПОТРІБНО:
Serial.write((byte*)&ConverterData, sizeof(ConverterData));

// Debug вивід (можна закоментувати)
//Serial.print("VFD: "); Serial.print(ConverterData.frequency);
//Serial.print("Hz, "); Serial.print(ConverterData.current);
Serial.println("A");
    } else {
        //Serial.print("Mon Error: "); Serial.println(result, HEX);
    }
}
} // Кінець керування частотником
void LedControl(int16_t brightnessCmd) {
    // Зберігаємо поточний рівень і цільовий рівень
    static float currentBrightness = 0; // float для плавності обчислень
    static int16_t targetBrightness = 0;
    static uint32_t lastStepTime = 0;

    // --- 1. Якщо прийшла нова команда (0-255), оновлюємо ціль ---
    if (brightnessCmd >= 0 && brightnessCmd <= 255) {
        targetBrightness = brightnessCmd;
    }

    // --- 2. Двигун анімації (працює завжди) ---
    if (millis() - lastStepTime >= FADE_SPEED) {
        lastStepTime = millis();

        // Логіка наближення поточного значення до цільового
        if (currentBrightness < targetBrightness) {
            currentBrightness += 1.0; // Можна змінити крок (напр. 0.5 або 2.0)
            if (currentBrightness > targetBrightness) currentBrightness = targetBrightness;
        }
        else if (currentBrightness > targetBrightness) {
            currentBrightness -= 1.0;
            if (currentBrightness < targetBrightness) currentBrightness = targetBrightness;
        }

        // --- ГАММА-КОРЕКЦІЯ (ОПТИМІЗАЦІЯ ДЛЯ ОКА) ---
        // Людське око сприймає яскравість не лінійно.
        // 128 - це не "половина" яскравості для ока, а набагато більше.

```

```

// Формула (val * val) / 255 робить загасання природним.

int pwmVal = (int)currentBrightness;

// Варіант А: Лінійний (як було у тебе)
// analogWrite(LED_PIN, pwmVal);

// Варіант Б: З квадратичною корекцією (виглядає "дорого" і плавно)
// Рекомендую цей варіант!
int correctedPWM = (pwmVal * pwmVal) / 255;
analogWrite(LED_PIN, correctedPWM);
}
}
// Читання DS18B20
float readSingleDS18(uint64_t address) {
    byte data[9];

    ds.reset();
    // Перетворюємо uint64_t* в byte* для OneWire
    ds.select((uint8_t*)&address);
    ds.write(0xBE); // Read Scratchpad

    // Читаємо 9 байт пам'яті датчика
    for (int i = 0; i < 9; i++) {
        data[i] = ds.read();
    }

    // Збираємо сире значення температури (16 біт)
    int16_t raw = (data[1] << 8) | data[0];

    // Перевіряємо на помилку (якщо датчик відпав, він повертає все 0xFF або 0x00)
    // -127 або 85 - це стандартні помилкові значення бібліотек,
    // тут ми просто повернемо результат конвертації.
    // 0x07D0 = 2000 decimal = 125.0C (макс).

    return (float)raw / 16.0;
}
void DSTempControl() {
    // Стани машини
    static enum { ST_IDLE, ST_CONVERTING } state = ST_IDLE;

    static uint32_t timerRotor = 0;
    static uint32_t timerWater = 0;
    static uint32_t convertStart = 0;

    // Прапори: що саме ми зараз міряємо?
    static bool needReadRotor = false;
    static bool needReadWater = false;

    switch (state) {

```

```

// --- СТАН 1: ОЧІКУВАННЯ ТАЙМЕРІВ ---
case ST_IDLE:
{
    bool trigger = false;

    // Перевірка таймера ротора
    if (millis() - timerRotor >= Settings.T_temp_rotor) {
        needReadRotor = true;
        timerRotor = millis();
        trigger = true;
    }

    // Перевірка таймера води
    if (millis() - timerWater >= Settings.T_temp_water) {
        needReadWater = true;
        timerWater = millis();
        trigger = true;
    }

    // Якщо хоч комусь потрібні дані - запускаємо вимірювання для ВСІХ
    if (trigger) {
        ds.reset();
        ds.skip(); // Звернення до всіх пристроїв на лінії
        ds.write(0x44); // Start Conversion

        convertStart = millis();
        state = ST_CONVERTING;
    }
}
break;

// --- СТАН 2: ОЧІКУВАННЯ КОНВЕРТАЦІЇ (750 мс) ---
case ST_CONVERTING:
    // Чекаємо 800 мс для надійності (12 біт потребують макс 750 мс)
    if (millis() - convertStart >= 800) {

        // 1. Якщо замовляли Ротор - читаємо 3 датчики
        if (needReadRotor) {
            RotorWindingsData.time = millis();
            for (int i = 0; i < 3; i++) {
                RotorWindingsData.temp[i] = readSingleDS18(addrRotor[i]);
            }
            // Рахуємо CRC (без останнього байта)
            RotorWindingsData.crc = crc8(&RotorWindingsData, sizeof(RotorWindingsData) -
1);

            Serial.write((byte*)&RotorWindingsData, sizeof(RotorWindingsData));
            // Debug
            // Serial.println("Rotor Updated");
        }
    }
}

```

```

// 2. Якщо замовляли Воду - читаємо 1 датчик
if (needReadWater) {
    WaterTempData.time = millis();
    WaterTempData.temp = readSingleDS18(addrWater);
    // Рахуємо CRC
    WaterTempData.crc = crc8(&WaterTempData, sizeof(WaterTempData) - 1);

    Serial.write((byte*)&WaterTempData, sizeof(WaterTempData));
    // Debug
    // Serial.println("Water Updated");
}

// Скидаємо прапори та повертаємось до очікування
needReadRotor = false;
needReadWater = false;
state = ST_IDLE;
}
break;
}
} // Кінець читання DS18B20
// Початок Тахометра
void sendRpmPacket() {
    RpmData.time = millis();
    // Рахуємо CRC (header + time + rpm)
    RpmData.crc = crc8(&RpmData, sizeof(RpmData) - 1);

    // ВІДПРАВКА
    Serial.write((byte*)&RpmData, sizeof(RpmData));
}
void sensHolla() {
    uint32_t now = micros();
    // Перевірка: чи пройшло достатньо часу від минулого імпульсу?
    if (now - _isrLastTime > DEBOUNCE_TIME) {
        _isrInterval = now - _isrLastTime;
        _isrLastTime = now;
        _isrNewPulse = true;
    }
}
void RpmControl() {
    static uint32_t timer = 0;

    // --- ЗАХИСТ ВІД НУЛЬОВОГО ІНТЕРВАЛУ ---
    // Якщо прилетіло 0, ставимо хоча б 200мс, щоб не "повісити" канал зв'язку
    if (Settings.T_rpm < 200) Settings.T_rpm = 200;

    // --- 1. ПЕРЕВІРКА НА ЗУПИНКУ (TIMEOUT) ---
    uint32_t lastPulseSafe;

    noInterrupts();

```

```

lastPulseSafe = _isrLastTime;
interrupts();

// Якщо імпульсів не було більше 4 секунд (STOP_TIMEOUT_US)
if (micros() - lastPulseSafe > STOP_TIMEOUT_US) {
    // Перевіряємо, чи ми "ще ідемо" з точки зору програми
    if (RpmData.rpm != 0) {
        RpmData.rpm = 0; // Фіксуємо зупинку

        // ВАЖЛИВО: Миттєва відправка пакету про зупинку!
        sendRpmPacket();

        // Скидаємо таймер періодичної відправки, щоб вона почалась заново від
моменту зупинки
        timer = millis();
    }
}

// --- 2. ОБРОБКА НОВИХ ДАНИХ ТА ПЕРІОДИЧНА ВІДПРАВКА ---
if (millis() - timer >= Settings.T_rpm) {
    timer = millis();

    // Читаємо дані з переривання
    uint32_t interval = 0;
    bool hasNew = false;

    noInterrupts();
    interval = _isrInterval;
    hasNew = _isrNewPulse;
    _isrNewPulse = false; // Скидаємо прапор новизни
    interrupts();

    // ВИПРАВЛЕННЯ: Прибрали перевірку "&& RpmData.rpm != 0"
    // Тепер ми рахуємо оберти, якщо просто є валідний інтервал
    if (interval > 0) {

        // Оновлюємо значення RPM тільки якщо прийшов НОВИЙ імпульс.
        // Якщо імпульсу не було, ми залишаємо старе значення (поки не спрацює
таймаут зупинки)
        if (hasNew) {
            // Використовуємо uint32_t для розрахунку, щоб уникнути переповнення
            // Формула: (60 sec * 1,000,000 us) / interval_us
            uint32_t calculatedRpm = 60000000UL / interval;

            // Обрізаємо, якщо раптом вийшло більше, ніж вміщає uint16_t (помилка
датчика/шум)
            if (calculatedRpm > 65535) calculatedRpm = 65535;

            RpmData.rpm = (uint16_t)calculatedRpm;
        }
    }
}

```

```

    }

    // Відправляємо періодичний пакет
    sendRpmPacket();
}
} // Кінець Тахометра
void ReadPCSerial() { // Приймання команд з ПК
// Читаємо поки є дані в буфері Serial
while (Serial.available()) {
    uint8_t b = Serial.read();

    // 1. Проста логіка заповнення буфера
    // Але нам треба ловити заголовок, якщо стався зсув
    if (bufIdx == 0 && b != 0xCD) { // 0xCD - це молодший байт 0xABCD (Little Endian)
        continue; // Ігноруємо сміття поки не знайдемо початок 0xCD
    }
    if (bufIdx == 1 && b != 0xAB) { // 0xAB - старший байт
        bufIdx = 0; // Це не заголовок, скидаємо
        continue;
    }

    rxPacket.raw[bufIdx++] = b;

    // 2. Якщо буфер повний - перевіряємо
    if (bufIdx >= sizeof(PacketData)) {

        // Рахуємо CRC по всьому пакету, КРИМ останнього байту (бо він і є CRC)
        uint8_t calcCRC = crc8(rxPacket.raw, sizeof(PacketData) - 1);

        if (calcCRC == rxPacket.structure.crc) {
            // --- ПАКЕТ ВАЛІДНИЙ ---
            ProcessCommand();
        }

        // Скидаємо індекс, щоб чекати новий пакет
        bufIdx = 0;
    }
}
}
void ProcessCommand() { // Обробка команд з ПК
// Звертаємось напряму до rxPacket.structure.data[]
// data[0] - це наша команда
if (rxPacket.structure.data[0] > 0 && rxPacket.structure.data[0] < 11) {
    BuzzControl(1);
} else {
    BuzzControl(2);
}
switch (rxPacket.structure.data[0]) {
    case 1: // Регулювання яскравості LED
        LedControl(rxPacket.structure.data[1]);

```

```

    break;

case 2: // Встановлення таймерів
    Settings.T_air_out = rxPacket.structure.data[1];
    Settings.T_air_in = rxPacket.structure.data[2];
    Settings.T_temp_anchor = rxPacket.structure.data[3];
    Settings.T_temp_water = rxPacket.structure.data[4];
    Settings.T_temp_rotor = rxPacket.structure.data[5];
    Settings.T_rpm = rxPacket.structure.data[6];
    Settings.T_pzems = rxPacket.structure.data[7];
    Settings.T_converter = rxPacket.structure.data[8];
    break;

case 3: // Встановлення калібрувальних коефіцієнтів PZEM
    Settings.C_pzem_u[0] = rxPacket.structure.data[1] / 100.0;
    Settings.C_pzem_u[1] = rxPacket.structure.data[2] / 100.0;
    Settings.C_pzem_u[2] = rxPacket.structure.data[3] / 100.0;
    Settings.C_pzem_i[0] = rxPacket.structure.data[4] / 100.0;
    Settings.C_pzem_i[1] = rxPacket.structure.data[5] / 100.0;
    Settings.C_pzem_i[2] = rxPacket.structure.data[6] / 100.0;
    break;

case 4: // Запит налаштувань
    Settings.time = millis();
    Settings.crc = crc8(&Settings, sizeof(Settings) - 1);
    Serial.write((byte*)&Settings, sizeof(Settings));
    break;

case 5: // Керування частотником
    ConverterControl(rxPacket.structure.data[1], rxPacket.structure.data[2] / 100.0);
    break;

case 6: // Керування звуковою сингалізацією
    BuzzControl(rxPacket.structure.data[1]);
    break;

case 7: // Вимкнути автомат частотника
    PowerOFF();
    break;

case 8: // Зберегти налаштування плати
    EEPROM.put(0, Settings);
    break;

case 9:

    break;

case 10:

```

```
        break;  
    }  
}
```

Джерело: розроблено автором.

Програма мікроконтролера на роторі ПЕМП

```

#include <GyverDS18Array.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Arduino.h>
#include <string.h>

// Пини JDY-40
#define JDY_TX 4 // JDY RX <- Arduino TX
#define JDY_RX 5 // JDY TX -> Arduino RX
#define CS_PIN 6
#define SET_PIN 7
SoftwareSerial jdySerial(JDY_RX, JDY_TX); // RX, TX

uint64_t addr[] = { // Масив адрес датчиків
  0x97B90ED635646128,
  0x9B3755F935646128,
  0x3DB43ED135646128,
  0x55BEEBF935646128,
  0xBF5A05D635646128,
  0xCB5423D635646128,
  0xA70BEEF935646128,
  0x383905D635646128,
  0xDF9928D635646128,
  0x5FA814D635646128,
  0xC183FFF935646128,
  0x5D0536D635646128,
  0xEB366CD135646128,
};
GyverDS18Array ds(14, addr, 13);

//uint32_t tmr;

struct SensorPacket { // Пакет даних на відправку
  byte startMarker; // Маркер початку (щоб знайти початок пакету)
  int16_t data[13]; // 13 значень, помножені на 100
  uint8_t crc; // Проста перевірка цілісності
} packet;

// функція розрахунку контрольної суми CRC
uint8_t crc8(const void* data, size_t length, uint8_t crc = 0) {
  const uint8_t* p = (const uint8_t*)data;
  while (length--) {
    uint8_t b = *p++, j = 8;
    while (j--) {
      crc = ((crc ^ b) & 1) ? (crc >> 1) ^ 0x8C : (crc >> 1);
      b >>= 1;
    }
  }
}

```

```

    return crc;
}

void setup() {
    pinMode(CS_PIN, OUTPUT);
    pinMode(SET_PIN, OUTPUT);
    //Serial.begin(9600);
    jdySerial.begin(9600);
    start_init();
    ds.setResolution(12);
    //ds.requestTemp();
}

void loop() {
    ReadDS();
}

void ReadDS() {
    //tmr = millis();
    ds.requestTemp();
    delay(50);
    if (ds.waitReady()) {
        memset(&packet, 0, sizeof(packet));
        for (int i = 0; i < ds.amount(); i++) {
            if (ds.readTemp(i)) {
                packet.data[i] = ds.getTemp() * 100;
            } else {
                packet.data[i] = 32767;
            }
        }
        for (int i = 0; i < ds.amount(); i++) {
            //Serial.print(packet.data[i]);
            //Serial.print("; ");
        }
        //Serial.println();
        sendData();
        //Serial.print("Time use: ");
        //Serial.print(millis() - tmr);
        //Serial.println(" ms");
    }
}

void sendData() {
    packet.startMarker = 0xFE;
    uint8_t crc = crc8((byte*)&packet, sizeof(packet) - 1);
    packet.crc = crc;
    digitalWrite(CS_PIN, LOW);
    delay(50);
    jdySerial.write((byte*)&packet, sizeof(packet));
    digitalWrite(CS_PIN, HIGH);
}

```

```
}  
  
void start_init() {  
    digitalWrite(SET_PIN, LOW);  
    digitalWrite(CS_PIN, LOW);  
    delay(50);  
    jdySerial.print("AT+BAUD4");  
    jdySerial.print("\r\n");  
    delay(10);  
    jdySerial.print("AT+RFID8899");  
    jdySerial.print("\r\n");  
    delay(10);  
    jdySerial.print("AT+DVIDC458");  
    jdySerial.print("\r\n");  
    delay(10);  
    jdySerial.print("AT+RFC055");  
    jdySerial.print("\r\n");  
    delay(10);  
    jdySerial.print("AT+POWE1");  
    jdySerial.print("\r\n");  
    delay(10);  
    //jdySerial.print("AT+CLSSA0");  
    //jdySerial.print("\r\n");  
    //delay(200);  
    digitalWrite(SET_PIN, HIGH);  
    digitalWrite(CS_PIN, HIGH);  
}
```

Джерело: розроблено автором.



(11) **155766**(19) **UA**

(51) МПК (2024.01)

G01N 1/10 (2006.01)*G01N 33/18* (2006.01)*C12M 1/02* (2006.01)*C12M 1/06* (2006.01)*C12M 1/38* (2006.01)*C02F 1/48* (2023.01)*C12Q 3/00**C12M 1/36* (2006.01)

(21) Номер заявки:	u 2023 05616	(72) Винахідники: Заблудський Микола Миколайович, UA, Бабак Денис Олегович, UA, Троханяк Віктор Іванович, UA, Шворов Сергій Андрійович, UA
(22) Дата подання заявки:	22.11.2023	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	04.04.2024	
(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня:	03.04.2024, Бюл. № 14	(73) Володілець: НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041, UA

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ В БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах, що містить вимірювальні прилади, апаратуру зв'язку і керуючий пристрій у вигляді контролера автоматичного керування, при цьому керуючий пристрій і апаратура зв'язку розміщені в ізотерічному контейнері, оснащеному джерелом електроживлення, який відрізняється тим, що містить монтажний фланець, вузол рухомої каретки, систему очищення, рухому систему захисних ковпачків і калібрувальних ємностей, вузол подавання калібрувальних рідин, монтажний фланець закріплено в отворі кришки біогазового реактора, зверху до монтажного фланця прикріплено ізотерічний контейнер, а знизу - вузол рухомої каретки, рухому систему захисних ковпачків і калібрувальних ємностей та вузол подавання калібрувальних рідин, вузол рухомої каретки містить лінійні напрямні, кроковий двигун з зубчастим шківом, каретку, ремінь переміщення каретки, лінійні напрямні одними кінцями прикріплені до монтажного фланця, а до протилежних кінців лінійних напрямних жорстко прикріплена планка, на якій розташований натяжний ролик ременя переміщення каретки, при цьому ремінь переміщення каретки разом з кроковим двигуном з зубчастим шківом та натяжним роликом створюють зубчасту передачу, каретка має отвори, через які проходять лінійні напрямні, створюючи ковзний контакт з кареткою, та центральний отвір, через який проходить ремінь переміщення каретки, при цьому одна з сторін ременя переміщення каретки жорстко прикріплена до каретки за допомогою затискача, вимірювальні прилади мають виносні на кабелі давачі, які закріплені на рухомій каретці, рухома система захисних ковпачків і калібрувальних ємностей містить захисний корпус, захисні ковпачки, калібрувальні ємності, кількість яких визначають кількість давачів вимірювальних приладів, механізм з сервоприводом для їх переміщення, вузол блокування каретки, система очищення містить послідовно з'єднані насос, трубопровід для подачі води та розпилювач, при цьому розпилювач розміщено на нерухомій дугоподібній пластині, яка прикріплена до монтажного фланця і захисного корпусу рухомої системи захисних ковпачків і калібрувальних ємностей, вузол подавання калібрувальних рідин містить електромагнітні клапани, трубопроводи і резервуари, при цьому резервуари і електромагнітні клапани розташовані в ізотерічному контейнері.

Методика та результати експериментальних досліджень системи очищення (характеристики помпи, картини гідродинамічних процесів при розпилюванні)

Забезпечення тривалої автономної роботи електротехнічного комплексу в агресивному середовищі біореактора вимагає надійного функціонування системи автоматичного очищення сенсорів. Як було теоретично обґрунтовано у підрозділі 3.2.1 за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки (CFD), ефективність змивання біоплівки критично залежить від гідродинамічних параметрів струменя – тиску, витрати рідини та конфігурації факела розпилення. Для верифікації розроблених математичних моделей та остаточного вибору конструктивних параметрів пристрою було проведено комплекс експериментальних досліджень. Метою даного етапу було експериментальне дослідження спектра розпилення та форми конуса рідини залежно від геометрії сопел форсунок.

Ефективність видалення біологічних забруднень з поверхні сенсорів безпосередньо залежить від енергетичних характеристик гідравлічного струменя, які формуються нагнітальним агрегатом – помпою. Для забезпечення розрахункових параметрів розпилення (тиск, витрата), обґрунтованих у підрозділі 2.2.1, необхідно дослідити електромеханічні характеристики помпи в динамічних режимах роботи. У розробленому пристрої використано мембранну помпу високого тиску з приводом від двигуна постійного струму (напруга живлення 12 В, номінальна потужність 60 Вт). Вибір мембранного типу зумовлений його здатністю створювати високий тиск (до 0,8 МПа) при відносно невеликих габаритах та можливості короткочасної роботи в режимі «сухого ходу» без пошкоджень.

Ж.1. Методика та результати експериментальних досліджень помпи високого тиску у системі розпилення промивної рідини та очищення

Для отримання реальних навантажувальних характеристик помпи було створено експериментальний стенд, оснащений автоматичним реєстратором параметрів на базі мікроконтролера та датчиків струму (INA219) і тиску. Частота

дискретизації становила 120 вимірювань на секунду, що дозволило зафіксувати швидкоплинні перехідні процеси під час пуску та виходу на робочий режим.

До складу станда увійшли: мембранна помпа (напруга живлення 9–14 В, номінальний струм 5 А, номінальна витрата 5 л/хв, максимальний тиск 6,8 бар), буферна ємність, система трубопроводів, сполучні адаптери та змінні форсунки з різними діаметрами вихідного отвору (від 0,2 мм до 0,8 мм). Оскільки перехідні процеси під час пуску помпи та формування струменя є швидкоплинними (тривають мілісекунди), використання стандартних мультиметрів чи манометрів з візуальним зчитуванням є неможливим. Для вирішення цієї задачі було створено високошвидкісний автоматичний реєстратор даних, схема якого зображена на рис.Ж.1.

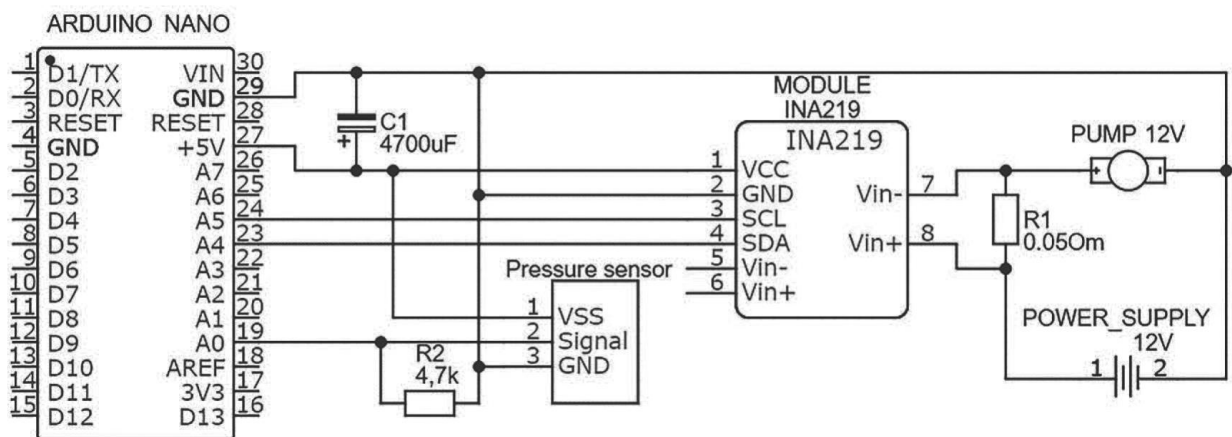


Рис. Ж.1. Принципова електрична схема автоматичного реєстратора на базі Arduino Nano та модуля INA219

Джерело: розроблено автором.

На рис. Ж.2 наведено осцилограми споживаної потужності помпи в залежності від тиску в нагнітальній магістралі.

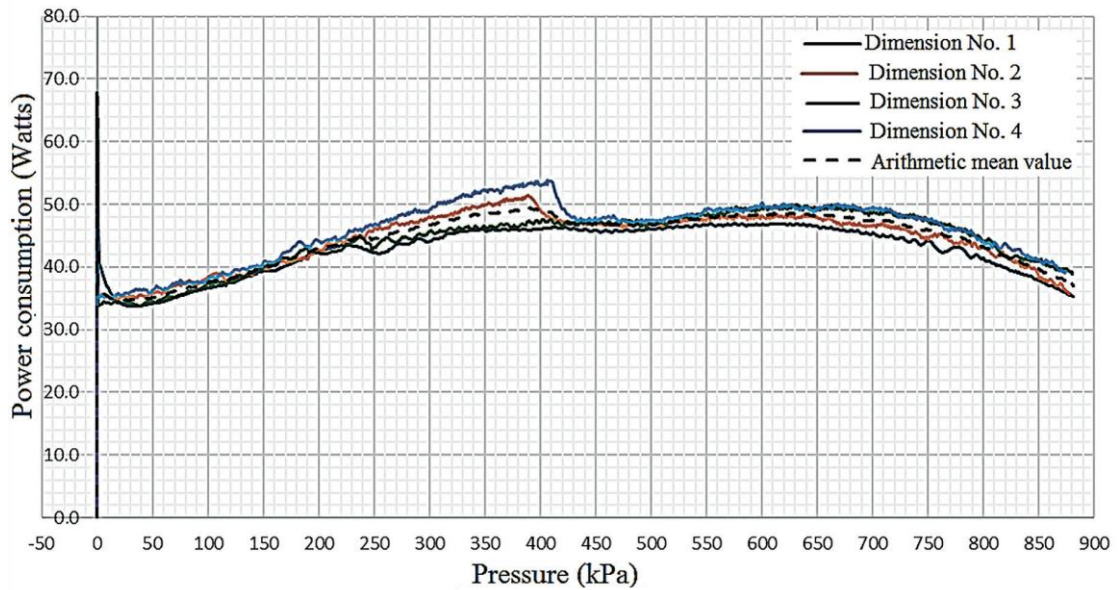


Рис. Ж.2. Навантажувальна характеристика помпи (потужність від тиску)

Джерело: розроблено автором.

Аналіз отриманих залежностей дозволяє виділити характерні зони роботи електроприводу:

1. **Пусковий режим:** Характеризується кидком струму, обумовленим пусковим моментом двигуна та інерцією рідини в трубопроводах. Пікова потужність у цей момент може сягати 70–80 Вт.
2. **Режим нагнітання:** Відбувається зростання тиску в системі та плавне збільшення споживаної потужності до рівня 50–55 Вт. Це відповідає етапу заповнення гідравлічної магістралі та відкриття зворотних клапанів.
3. **Робочий (сталий) режим:** Після стабілізації тиску на рівні, що визначається гідравлічним опором форсунок, споживана потужність стабілізується на рівні 45–48 Вт.

Дослідження перехідних процесів тиску. Критично важливим параметром для якості очищення є швидкість наростання тиску на зрізі сопла. Повільне зростання тиску призводить до неефективної витрати промивної рідини на початку циклу, коли кінетична енергія струменя ще недостатня для змивання біоплівки.

На рис. Ж.3 представлено динаміку зміни тиску для форсунок з різним діаметром вихідного отвору ($d_c = 0,2 \dots 0,8$ мм).

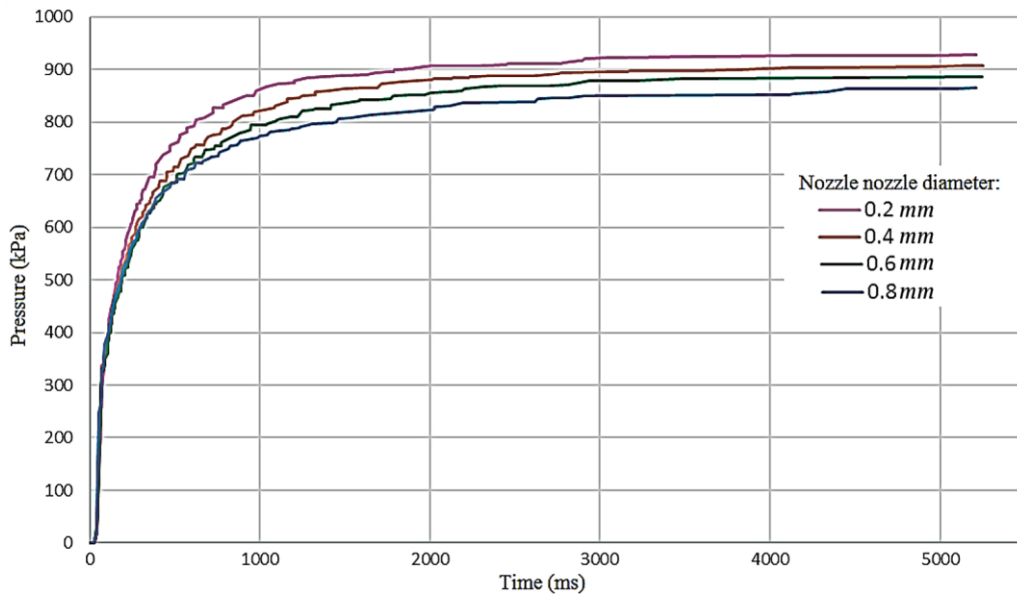


Рис. Ж.3. Динаміка тиску води в отворах сопел різного діаметра

Джерело: розроблено автором.

Експериментально встановлено, що для обраного оптимального діаметра сопла 0,8 мм час виходу на робочий режим (90% від номінального тиску) становить близько 1–1,2 с. Максимальний тиск у системі при цьому досягає 864 кПа (8,6 атм), що є достатнім для формування турбулентного струменя. Зі зменшенням діаметра сопла до 0,2 мм тиск у системі зростає до 927 кПа, проте різко падає витрата рідини (до 33 л/год), що зменшує площу покриття струменем. З іншого боку, збільшення діаметра понад 1,0 мм призводить до падіння тиску нижче 500 кПа через обмежену продуктивність помпи, що погіршує миючі властивості струменя.

Керування електроприводом помпи. Враховуючи отримані характеристики, для керування помпою обґрунтовано використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) за допомогою силового MOSFET-транзистора. Це дозволяє реалізувати функцію плавного пуску (Soft Start) для обмеження пускових струмів, що подовжує ресурс колекторного вузла двигуна та мембранного механізму. Крім того, ШІМ-керування дає можливість програмно регулювати інтенсивність розпилення залежно від ступеня забруднення датчиків, реалізуючи адаптивні алгоритми очищення. Отримані результати підтверджують, що енергетичні параметри обраної помпи повністю відповідають вимогам гідродинамічної моделі (розділ 3.2.1), забезпечуючи ефективне видалення забруднень при оптимальному діаметрі сопел 0,8 мм.

Ж.2. Методика та результати дослідження спектра розпилення (метод гофрованого столу)

Для отримання об'єктивних даних щодо рівномірності та форми розподілу рідини по поверхні очищення (спектра розпилення) було застосовано класичну методику дослідження за допомогою гофрованого столу. Цей метод дозволяє кількісно оцінити однорідність факела розпилення, що є критично важливим для гарантованого змивання біоплівки з усіх датчиків каретки.

Експериментальна установка: Дослідження проводилися в лабораторних умовах. Спеціальний гофрований стіл (розміром 900×970 мм) був зібраний із 18 пластикових кутників (профіль 40×40 мм). Відстань між вершинами сусідніх кутників становила 56,6 мм. Форсунка закріплювалася на фіксованій висоті 0,5 м над поверхнею столу (рис.Ж.4). Кут розпилення відносно площини гофрованого столу складав приблизно 110° .



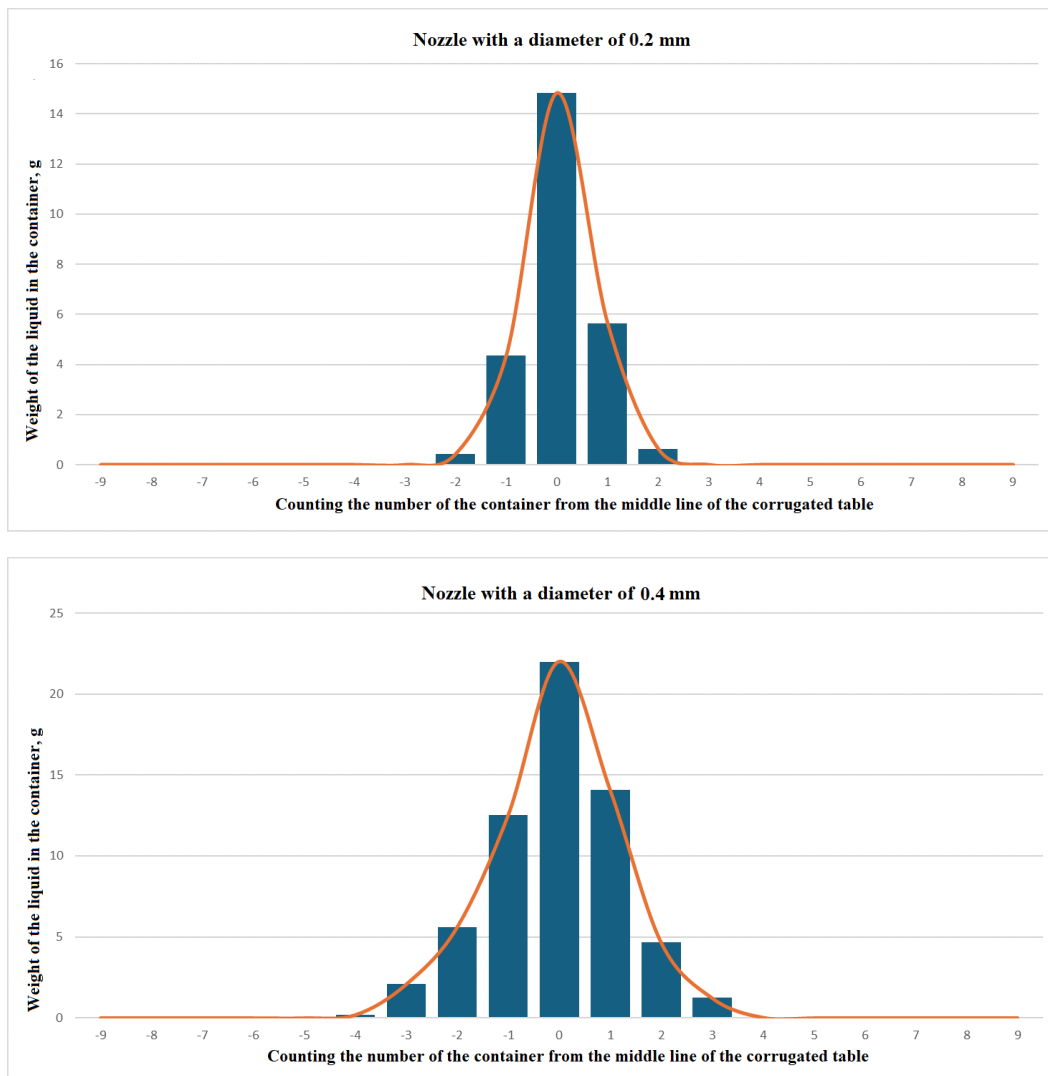
Рис.Ж. 4. Фотографія лабораторного стенда для визначення спектра розпилення за допомогою гофрованого столу та мірних ємностей

Джерело: розроблено автором.

Процедура вимірювання: Промивна рідина під робочим тиском (забезпеченим експериментальною помпою) розпилювалася на стіл. Краплі рідини, потрапляючи на похилі грані кутників, стікали по жолобах у 17 однакових пластикових ємностей, розташованих послідовно в нижній частині столу на однаковій відстані одна від одної.

Час розпилення суворо контролювався: 2 хвилини для сопел малого діаметра (0,2 та 0,4 мм) і 3 хвилини для сопел більшого діаметра (0,6 та 0,8 мм) для накопичення репрезентативної маси води. Після завершення кожного циклу розпилення здійснювалося прецизійне зважування кожної з 17 ємностей за допомогою електронних ваг DJ-660-0.01 (НВП «Техноваги», Україна) з точністю до 0,01 г. Кожен експеримент повторювався тричі для забезпечення статистичної достовірності.

Аналіз результатів розподілу: графіки масового розподілу рідини по ємностях (рис.Ж.5) чітко демонструють зміну фізики процесу розпилення при варіюванні діаметра сопла.



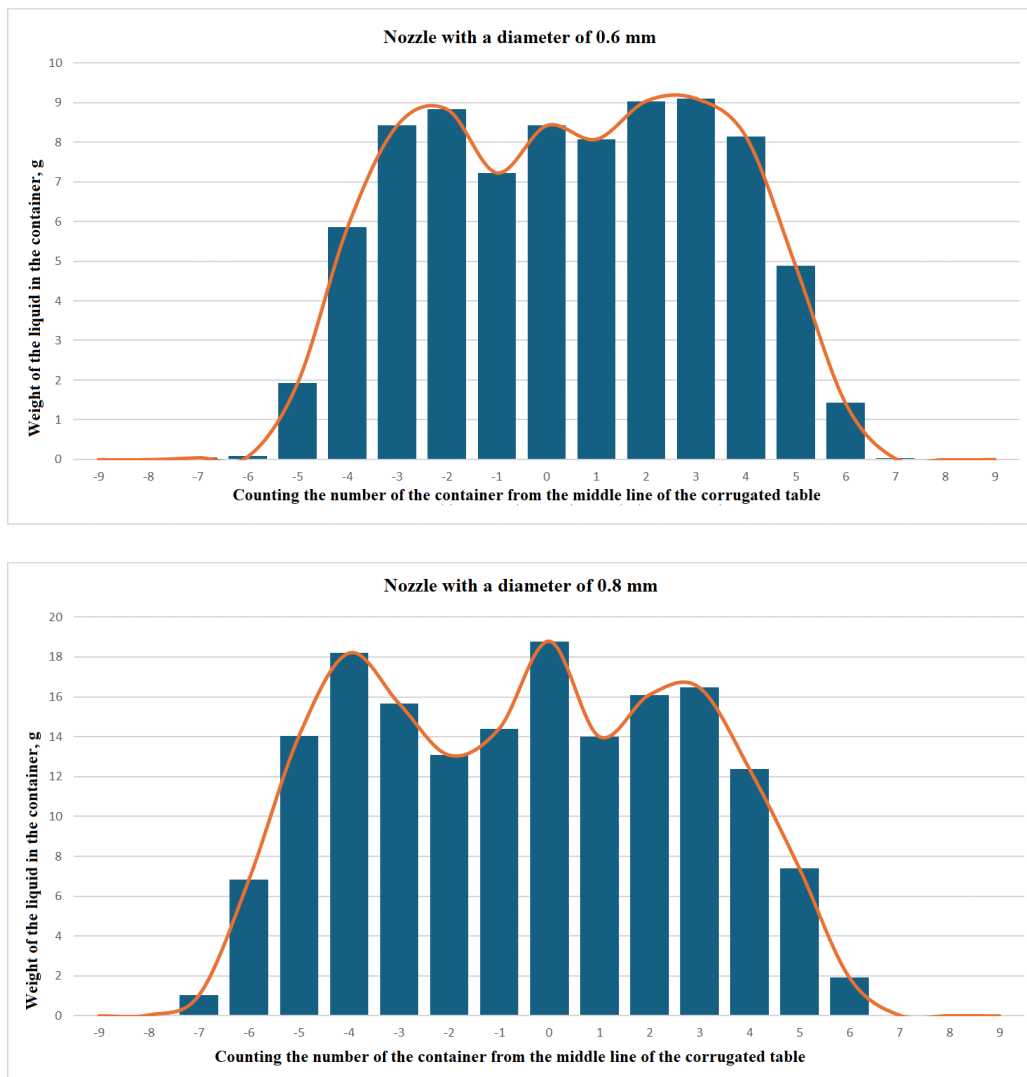


Рис. Ж.5. Гістограми розподілу кількості рідини (у грамах), зібраної з гофрованого столу для сопел 0,2 мм, 0,4 мм, 0,6 мм та 0,8 мм

Джерело: розроблено автором.

Для форсунок з діаметрами 0,2 мм та 0,4 мм зафіксовано класичний нормальний (гауссівський) розподіл Гаусса. Основна маса рідини (струміль) концентрується в центральних 3-5 ємностях, формуючи вузький факел. Це свідчить про високу пробивну здатність струменя в центрі, але вкрай низьке покриття периферійних зон, що робить такі форсунки непридатними для одночасного очищення масиву з декількох сенсорів на каретці ПАК.

Кардинально інша картина спостерігається для форсунок з діаметрами 0,6 мм та 0,8 мм. Розподіл рідини втрачає яскраво виражений центральний пік і набуває більш рівномірного характеру з двома згладженими екстремумами (бімодальний

розподіл). Такий характер розподілу відповідає площинним розпилювачам, де спектр турбулентних потоків розширює конус розпилення. При використанні сопла 0,8 мм рідина рівномірно розподіляється по 11-13 ємностях, формуючи широку зону ефективного змочування.

Статистичний аналіз показав, що для сопел 0,6–0,8 мм коефіцієнт варіації (відсоткове відношення середньоквадратичного відхилення до середнього арифметичного) не перевищував 11,5 %. Це підтверджує високу однорідність струменя та прийнятність такого режиму розпилення для ефективного охоплення всієї групи датчиків у камері очищення. Отримані експериментальні дані повністю корелюють з картинами ліній течії (Streamlines), отриманими раніше в середовищі Ansys Fluent.

Проведені експериментальні дослідження дозволили довести високу ефективність обраної системи гідроструминного очищення. Підтверджено, що оптимальним конструктивним рішенням для модуля ПАК є використання форсунок із внутрішнім діаметром 0,8 мм. За робочого тиску близько 0,86 МПа вони формують турбулентний конічний струмінь, здатний ефективно та рівномірно змивати біофоулінг з усієї площі каретки сенсорів, унеможливаючи утворення незмивних "мертвих зон".

Вибір та обґрунтування елементної бази апаратно-програмного комплексу керування та збору даних з обертових частин заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача

И.1. Система вимірювання електричних та неелектричних величин

Ефективність функціонування розробленого електротехнічного комплексу та достовірність результатів експериментальних досліджень процесів анаеробного бродіння критично залежать від точності, синхронності та повноти збору даних про стан заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП) та навколишнього середовища. Оскільки ПЕМП виконує функції одночасного перемішування, нагрівання та магнітного впливу на субстрат, система збору даних повинна фіксувати комплекс параметрів, які всебічно описують перетворення електричної енергії в теплову та механічну.

Виходячи з цього, розроблена вимірювальна система функціонально поділяється на два основні блоки: підсистему вимірювання електричних та підсистему вимірювання неелектричних величин.

Підсистема вимірювання електричних величин. Електричні параметри ПЕМП є не лише показниками енергоспоживання, але й важливими індикаторами технологічного процесу. Зміна активної потужності та струму статора при незмінній напрузі є прямим наслідком зміни моменту опору на валу, що, у свою чергу, корелює зі зміною в'язкості біогазового субстрату. Це дозволяє використовувати ПЕМП як непрямий віскозиметр.

Особливістю розробленого експериментального стенда є багатоваріантність способів живлення та керування ПЕМП. Залежно від цілей експерименту (дослідження мезофільного чи термофільного режимів, оцінка впливу магнітного поля тощо), як виконавчий орган для живлення ПЕМП може використовуватися один із трьох пристроїв [55]:

- Векторний перетворювач частоти – для точного керування кутовою швидкістю та моментом за рахунок зміни частоти (f) та напруги (U).

- Симісторний регулятор напруги (тиристорний перетворювач) – для фазового регулювання діючого значення напруги при незмінній частоті мережі.

- Трифазний автотрансформатор – для формування чистої синусоїдальної напруги зі змінною амплітудою без внесення вищих гармонік, що важливо для чистих теплових випробувань.

Враховуючи таку варіативність джерел живлення, а також те, що напруга та струм можуть мати несинусоїдну форму, система вимірювання повинна забезпечувати точне обчислення діючих (RMS) значень. Для реалізації цієї задачі апаратна частина комплексу оснащена трьома спеціалізованими вимірювальними модулями PZEM-004T v3.0 (по одному на кожен фазу живлення) .

Модулі PZEM-004T здійснюють гальванічно розв'язане вимірювання струму (через трансформатор струму) та напруги (через інтегрований подільник) і містять вбудовані обчислювальні ядра для розрахунку наступних параметрів:

- Діюче значення напруги U (В);
- Діюче значення струму I (А);
- Активна потужність P (Вт);
- Частота змінного струму f (Гц);
- Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$.

Кожен модуль має власну адресу, що дозволяє підключити їх паралельно. Головний мікроконтролер (AVR ATmega328P) через програмний UART послідовно опитує кожен з модулів із заданою періодичністю. В алгоритмі мікропрограми закладено можливість застосування програмних калібрувальних коефіцієнтів, що зберігаються в EEPROM мікроконтролера. Це дозволяє компенсувати апаратні похибки вимірювальних трансформаторів без фізичного втручання в схему стенда.

Підсистема вимірювання неелектричних величин. До неелектричних величин, що підлягають безперервному моніторингу, відносяться: кінематичні показники (частота обертання ротора), мікрокліматичні умови (температура і вологість повітря) та розподіл температур в елементах конструкції ПЕМП і субстраті.

Вимірювання кінематичних параметрів (частоти обертання) масивного порожнистого феромагнітного ротора є базовим параметром для аналізу гідродинамічної ефективності перемішування. Для її вимірювання застосовано безконтактний метод на базі цифрового датчика Холла А3144.

Конструктивно магніт закріплено на обертовому роторі, а сам датчик Холла стаціонарно встановлено на проміжній платі, яка жорстко зафіксована на корпусі нерухомого статора (тримачі первинної обмотки). При кожному оберті ротора датчик генерує прямокутний імпульс. Сигнал з датчика подається на вхід зовнішнього переривання мікроконтролера. Вимірювання реалізовано методом фіксації періоду слідування імпульсів з мікросекундною точністю за допомогою апаратного таймера. Розрахунок частоти обертання n (об/хв) виконується за формулою:

$$n = \frac{60 * 10^6}{\Delta t_{imp}}$$

де Δt_{imp} – часовий інтервал між двома сусідніми імпульсами у мікросекундах.

Для забезпечення стабільності показів програмне забезпечення мікроконтролера містить цифровий фільтр брязкоту контактів та алгоритм захисту від ділення на нуль, який примусово обнуляє покази швидкості у разі відсутності імпульсів протягом заданого таймауту.

Вимірювання мікрокліматичних параметрів є важливим, оскільки ПЕМП працює в умовах перепадів температур, існує ризик утворення конденсату на внутрішніх електронних компонентах (статорі, проміжній платі, обмотках обертового трансформатора). Для контролю цих процесів застосовано високоточні цифрові датчики температури та відносної вологості АНТ10, які працюють по шині I2C.

У системі передбачено два таких датчики для порівняльного аналізу:

- Внутрішній датчик: закріплений на статичній частині (проміжній платі) всередині порожнини ПЕМП. Він безперервно відстежує внутрішній мікроклімат, дозволяючи системі керування виявляти критичне підвищення вологості (ризик пробою ізоляції або замикання) чи перегрів повітряного простору навколо статора.

•Зовнішній датчик: розташований поза ПЕМП, безпосередньо біля головної плати керування. Він фіксує температуру та вологість навколишнього середовища. Порівняння показів цих двох датчиків дає змогу оцінити ефективність тепловідведення від корпусу перетворювача в навколишнє середовище та попередити аварійні ситуації [5, 55].

Вимірювання температурного стану агрегату є найбільш масштабним завданням підсистеми та отримання детальної теплової карти (термограми) ПЕМП. Для цього використано масив із 16-ти інтегральних цифрових датчиків температури DS18B20, що працюють за протоколом 1-Wire. Датчики розділені на дві групи: статичну (на лобових частинах обмоток статора) та динамічну (на обертовому масивному роторі та його фланцях). Завдяки унікальним 64-бітним адресам кожного датчика, вони підключаються паралельно до однієї лінії даних, що мінімізує кількість провідників. Детальне обґрунтування просторової топології їх розміщення, зон контролю та алгоритмів опитування в умовах обертання буде наведено у наступному підрозділі 3.5.2.

Таким чином, розроблена система дистанційного та локального вимірювання забезпечує вичерпний збір масиву електричних, кінематичних та теплових параметрів. Інтеграція цих даних в єдиний потік дозволяє системі керування об'єктивно оцінювати ефективність електромеханічного перетворення та вносити відповідні корективи в режими роботи біогазового реактора.

И.2. Обґрунтування структури та топології системи моніторингу

Створення адекватної теплової та гідродинамічної картини всередині біогазового реактора є неможливим за умови використання традиційних підходів, що базуються на застосуванні поодиноких стаціонарних датчиків. Біогазовий субстрат є складним гетерогенним середовищем, схильним до утворення температурних шарів та формування застійних «мертвих» зон. Застосування заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП) створює унікальну можливість використовувати його масивний обертовий ротор як мобільну платформу для сканування об'єму реактора.

Для реалізації цієї можливості було розроблено багаторівневу топологію системи моніторингу, яка включає просторову топологію розміщення датчиків та логічну топологію мережі передачі даних.

Просторова топологія вимірювальної мережі є основою системи температурного контролю ПЕМП (рис.И.1). Це є просторово-розподілена мережа з 16-ти прецизійних цифрових інтегральних датчиків температури DS18B20. Їх розміщення спроектовано таким чином, щоб забезпечити побудову повної 3D-моделі теплового поля з урахуванням особливостей теплового навантаження та зон найбільшої ймовірності виникнення перегріву. Датчики фізично розділені на дві групи: роторну (динамічну) та статорну (статичну).

Оскільки зовнішній порожнистий феромагнітний ротор ПЕМП є основним джерелом теплової енергії (за рахунок вихрових струмів) і безпосередньо контактує з біомасою, на ньому зосереджена найбільша кількість точок вимірювання. На ньому встановлено 13 датчиків:

- Циліндрична частина ротора (9 датчиків): Розміщені по висоті у трьох рівнях (верхня, середня та нижня зони реактора), що дозволяє контролювати вертикальний градієнт температури субстрату. На кожному рівні встановлено по 3 датчики, зміщені по колу на 120° один відносно одного. Така кругова симетрія забезпечує виявлення локальних температурних аномалій, що можуть виникнути внаслідок налипання субстрату на окремі лопаті або несиметричного обтікання ротора в'язкою рідиною.

- Торцеві фланці ротора (4 датчики): Розміщуються на верхньому та нижньому фланцях ротора (по 2 на кожному, зміщені на 180°). Ці зони є критичними з точки зору крайових ефектів електромагнітного поля та теплообміну з торцевими потоками субстрату. Дані з цих датчиків дозволяють діагностувати асиметрію теплового навантаження вздовж осі обертання.

Лобові частини обмоток є найбільш вразливими вузлами електричної машини, оскільки саме тут часто виникає концентрований перегрів через локалізацію струмів та погіршені умови відведення тепла у порівнянні з пазовими частинами. Тому три датчики були інтегровані безпосередньо у лобові частини обмоток нерухомого

статора. Безперервний моніторинг цієї зони є основою системи теплового захисту ПЕМП від аварійних режимів.

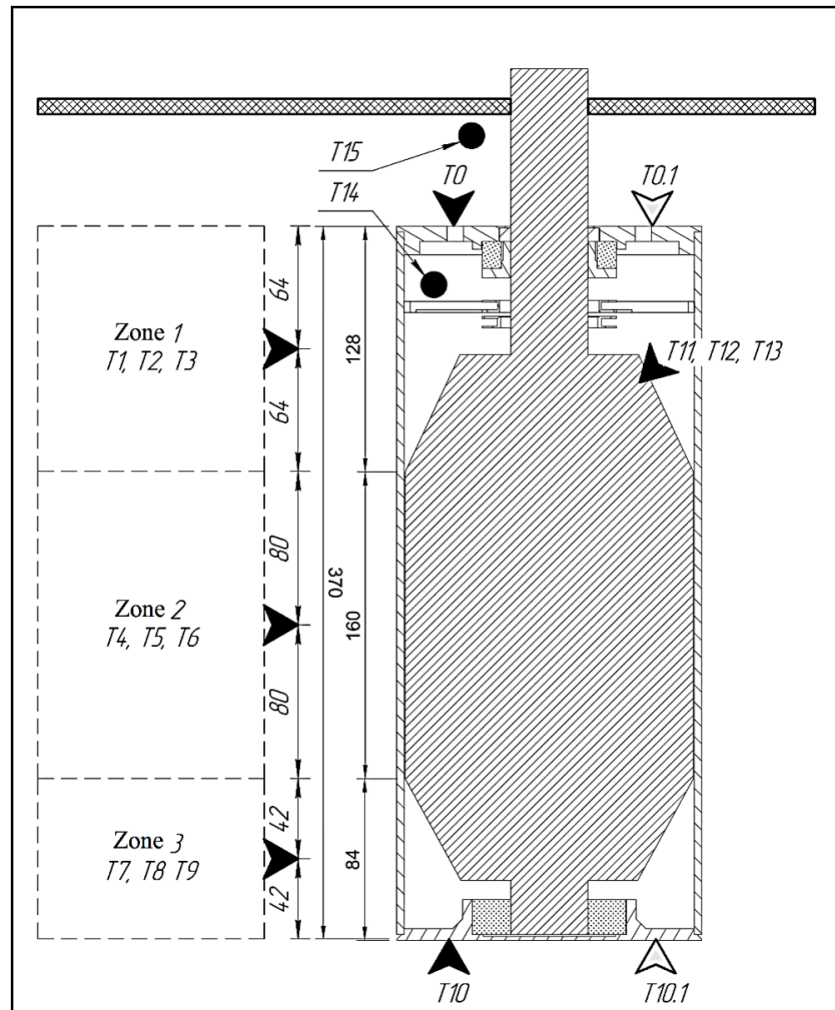


Рис.И.1. Розміщення датчиків температури в біореакторі

Джерело: розроблено автором

Таким чином, обґрунтована просторова та інформаційна топологія системи моніторингу повністю відповідає специфіці роботи заглибного ПЕМП, забезпечуючи високу роздільну здатність теплової картини реактора, мінімізацію апаратних витрат та стійкість до промислових електромагнітних завад.

И.3. Вибір та обґрунтування елементної бази апаратної частини

Розробка апаратно-програмного комплексу для заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП) вимагає ретельного підходу до вибору елементної бази. Специфіка об'єкта полягає у тому, що електронні компоненти повинні надійно функціонувати в умовах жорстких обмежень:

високий рівень електромагнітних завад, обмежений енергетичний бюджет на обертовій частині та розміщення у герметичних боксах без можливості активного охолодження. З огляду на ці фактори, структуру комплексу було побудовано на базі двох різних мікроконтролерних платформ, кожна з яких оптимізована під конкретні задачі свого рівня.

Обґрунтування вибору мікроконтролерів системи. Нерухома (статорна) частина комплексу виконує роль центрального диспетчера. Її завдання – збір даних з статичних датчиків, приймання телеметрії з ротора по радіоканалу, зчитування енергетичних параметрів з трьох модулів PZEM-004T та передача всього масиву даних на термінал ПК. Для реалізації цього вузла було обрано мікроконтролер AVR ATmega328PB у форм-факторі сумісної налагоджувальної плати Arduino Nano. Ключовою перевагою модифікації «PB» порівняно зі стандартною «P» є наявність двох апаратних модулів USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter). Наявність двох апаратних UART дозволила рознести критичні потоки даних, залишивши програмний UART лише для менш пріоритетних задач:

- UART 0 використовується для зв'язку плати з терміналом ПК (передача зібраних даних та прийом керуючих команд);

- UART 1 виділено виключно для телеметрії. Це є критично важливим для гарантованого перехоплення пакету даних з ротора одразу після ввімкнення повітряного трансформатора, виключаючи будь-які пропуски байтів у короткому вікні передачі.

- Програмний UART застосовується для опитування вимірювальних модулів PZEM-004T. Хоча програмна реалізація послідовного порту блокує переривання під час прийому/передачі, для даної архітектури це не є недоліком. Модулі PZEM працюють на низьких швидкостях обміну, а диспетчер задач (система таймерів) налаштований так, що в один період опитується лише один датчик. Команди керування від ПК, що надходять у цей момент, стають у чергу апаратного буфера UART 0 і обробляються одразу після завершення опитування PZEM. Враховуючи значну механічну інертність масивного ротора ПЕМП, такі мілісекундні затримки

реакції системи є абсолютно некритичними для підтримки стабільності технологічного процесу.

Обертвий вузол функціонує в умовах жорсткого енергетичного дефіциту, оскільки живиться від вторинної обмотки повітряного трансформатора, максимальна передавана потужність якого становить 100–300 мВт. Більш того, живлення має імпульсний характер (подається лише на час вимірювання та передачі).

Для роторної частини обґрунтовано використання мікроконтролера LGT8F328P. Цей чіп є вдосконаленим аналогом архітектури AVR, сумісним з екосистемою Arduino, проте має ряд критично важливих переваг для даного застосування:

- Розширений діапазон напруги живлення: LGT8F328P здатен стабільно працювати при напрузі від 1,8 В до 5,5 В. Як свідчать осцилограми перехідних процесів (Рис. Осцилограма повного циклу роботи мікроконтролера), під час подачі напруги на первинну обмотку трансформатора напруга на вторинній обмотці зростає експоненціально. Здатність мікроконтролера стартувати та коректно функціонувати вже при 1,8 В гарантує його швидку ініціалізацію та стабільну роботу в умовах нестабільного живлення від обертового трансформатора, коли ємнісний фільтр ще не повністю зарядився.

- Висока продуктивність: Максимальна тактова частота становить 32 МГц (проти 16/20 МГц у класичного ATmega), що дозволяє прискорити математичну обробку даних від 13-ти датчиків DS18B20 та розрахунок контрольної суми CRC-8, тим самим скорочуючи час активного стану (вікно споживання енергії).

- Низька вартість та енергоефективність: Оптимізована архітектура ядра дозволяє знизити загальне енергоспоживання при збереженні високої швидкодії, що розвантажує обертовий трансформатор.

Вибір надійного радіо модуля пов'язаний з необхідністю створення надійного бездротового каналу передачі даних зсередини металевого корпусу ПЕМП, що працює в умовах сильних електромагнітних завад, виявилось одним із найскладніших етапів розробки.

На початковому етапі проектування пріоритет віддавався трансиверам діапазону 433 МГц (з амплітудною модуляцією OOK/ASK). Їх вибір аргументувався ультранизьким споживанням струму (15–20 мА в режимі передачі) та кращою здатністю низькочастотних радіохвиль огинати металеві перешкоди. Однак натурні експерименти на фізичному стенді виявили фундаментальний недолік цього рішення. Робота потужного джерела живлення статора (ШІМ-інвертора або симісторного регулятора) генерує широкий спектр електромагнітного шуму. Ці завади перекривали частотний діапазон 433 МГц, викликаючи масову втрату пакетів телеметрії (до 60–80% битих пакетів) та повну дестабілізацію зв'язку.

Для вирішення проблеми електромагнітної сумісності (EMC) було прийнято рішення про перехід на більш високий частотний діапазон (ISM-діапазон 2.4 ГГц) з використанням модулів JDY-40. Цей модуль базується на технології бездротового послідовного порту, підтримує високу швидкість передачі даних і має відмінну завадостійкість до низькочастотних промислових шумів.

Хоча пікове струмоспоживання модуля JDY-40 в режимі передачі (TX) становить близько 40 мА, що більше, ніж у модулів 433 МГц, але це не стало критичним для енергетичного бюджету роторного вузла з таких причин:

- Скорочення вікна передачі: Завдяки високій швидкості обміну час, необхідний для передачі пакета даних, суттєво зменшився, тому загальна витрачена енергія залишилася в межах норми.

- Апаратний режим сну: Модуль JDY-40 підтримує режим сну, в якому він практично не споживає потужності. Локальний мікроконтролер LGT8F328P тримає радіомодуль у цьому стані більшість часу (зокрема під час ініціалізації та фази конверсії температур датчиками), активуючи його лише на кілька мілісекунд для безпосередньої відправки сформованого пакета.

Вибір первинних перетворювачів (датчиків) та модулів збору даних здійснювався з урахуванням необхідності мінімізації впливу електромагнітних полів, забезпечення високої точності вимірювань та розвантаження центральних обчислювальних ядер мікроконтролерів, так було обрано:

- Модулі PZEM-004T v3.0: Використовуються для безперервного моніторингу енергетичних параметрів живлення статора (діючі значення напруги та струму, активна потужність, частота, коефіцієнт потужності $\cos \phi$). Кожен з трьох модулів (по одному на фазу) оснащений власним мікропроцесором, який самостійно виконує високочастотне семплювання форми струму та напруги і розраховує RMS-значення. Це повністю знімає критичне обчислювальне навантаження з Ведучого-мікроконтролера (ATmega328PB), дозволяючи йому зосередитися на диспетчеризації та телеметрії. Крім того, використання безконтактних трансформаторів струму та опторозв'язки ліній зв'язку (UART) забезпечує повну гальванічну ізоляцію низьковольтної електроніки від силових кіл перетворювача, що є фундаментальною вимогою безпеки при експлуатації експериментального стенда.

- Датчики температури DS18B20: Інтегральні цифрові термометри з внутрішнім 12-бітним аналого-цифровим перетворювачем. Їх застосування є технічно оптимальним рішенням для умов ПЕМП. По-перше, передача даних здійснюється у цифровому вигляді за протоколом 1-Wire, що робить сигнал абсолютно нечутливим до потужних наведень змінного магнітного поля ПЕМП (на відміну від аналогових термопар, де наведена електрорушійна сила суттєво спотворила б результати). По-друге, унікальна 64-бітна адресація дозволяє підключити весь масив із 13-ти роторних датчиків паралельно до однієї лінії даних, кардинально зменшуючи кількість провідників усередині герметичного ротора. Висока роздільна здатність (до 0,0625 °C) забезпечує фіксацію навіть мінімальних теплових градієнтів у субстраті.

- Датчики мікроклімату АНТ10: Високоточні цифрові сенсори, що працюють по шині I2C і гарантують похибку вимірювання відносної вологості не більше +/-2%. В умовах роботи ПЕМП при значних перепадах температур існує ризик виникнення точки роси. Завдяки датчикам АНТ10 система безперервно контролює параметри повітря всередині статорної порожнини, що дозволяє попередити утворення конденсату та уникнути пробою електричної ізоляції обмоток.

- Цифровий датчик Холла А3144: Застосовується для точної фіксації частоти обертання масивного порожнистого феромагнітного ротора. На відміну від

механічних контактів (герконів), які схильні до брязкоту та швидкого зносу в умовах вібрації, А3144 є безконтактним твердотільним елементом з вбудованим тригером Шмітта. Він формує чіткі прямокутні імпульси при проходженні магніту-ініціатора. Висока швидкодія датчика забезпечує стабільну роботу апаратних переривань мікроконтролера, що є базовою умовою для точного розрахунку кінематичних параметрів (зокрема, ковзання ротора) в режимі реального часу.

Комплексний підхід до вибору елементної бази дозволив створити апаратно-програмну інфраструктуру, яка гарантує безперебійний збір наукових даних в умовах високих електромагнітних та теплових навантажень.

Обґрунтування технічних рішень по забезпеченню вибухозахищеності електрообладнання електротехнічного комплексу

В анаеробному біореакторі може утворюватися вибухонебезпечна суміш. Анаеробні бактерії, що розкладають органічні речовини, продукують метан як один з основних продуктів метаболізму. Метан є легкозаймистим газом, тому у випадку, якщо концентрація метану досягне певного рівня в повітряному просторі біореактора (зазвичай від 5% до 15% у повітрі), це може створити ризик вибуху при наявності джерела запалення. Окрім метану, в анаеробних умовах можуть також утворюватися і інші гази, такі як водень, який також є вибухонебезпечним. Тому важливо забезпечити контроль за газовими викидами і запобіжні заходи для уникнення ризиків вибухів у таких системах. Зокрема, запропоновано розміщення електромагнітної системи, обертового трансформатора і системи моніторингу ПЕМП в середині вибухобезпечної оболонки. При цьому вихідна частина порожнистої вісі, яка виконує функції утримувача та магістралі для силових і контрольних кабелів ПЕМП, має вибухонепроникнене з'єднання з фланцем вибухобезпечної оболонки.

Для забезпечення умов безпечного використання крокового двигуна типорозміру NEMA17(42), моделі 17HS4401S в експериментальному анаеробному біореакторі запропоновано розміщення його в середині вибухобезпечної оболонки. При цьому вихідний кінець валу крокового двигуна має вибухонепроникнене з'єднання з фланцем вибухобезпечної оболонки. Аналогічне рішення прийнято і для заглибного ПЕМП. Вибухонепроникність характеризується величиною зазору, через який полум'я або розпечені продукти вибуху, виходячи назовні не спричиняють запалення вибухонебезпечної суміші ззовні оболонки електричного обладнання. Максимально припустима висота (ширина) щілини, що забезпечує вибухонепроникність, розраховується за формулою:

$$h = \frac{S_{кр}}{k_{пр}}$$

де $S_{кр}$ – критичне значення висоти (ширини) щілини, для якого ймовірність передачі вибуху менше 50%, $k_{пр}$ – коефіцієнт приведення вибухонепроникного з'єднання до єдиного рівня вибухозахисту (для циліндричних з'єднань $k_{пр} = 2$).

Критичне значення висоти (ширини) щілини (рис.К.1) визначається за рекомендаціями [41, 42].

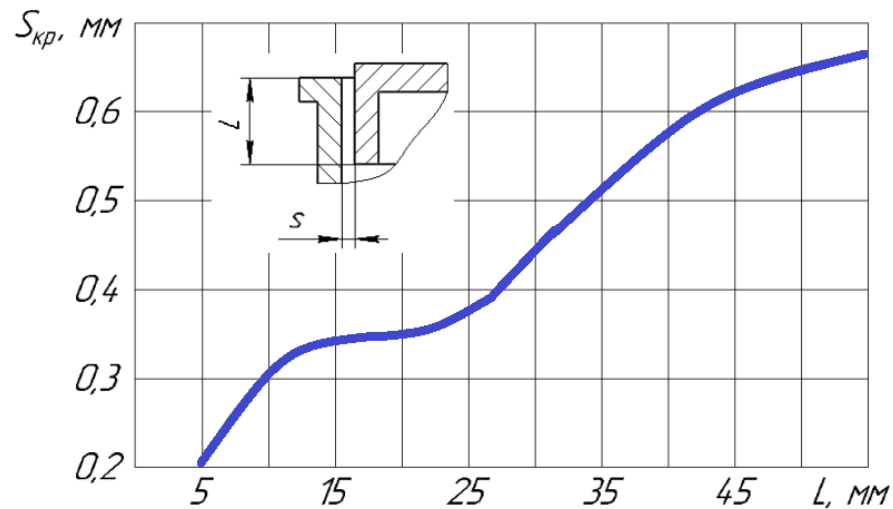


Рис.К.1. Залежність критичної величини зазору ($S_{кр}$) від ширини фланцевого з'єднання (L)

Джерело: розроблено автором з використанням [41, 42].

ATEX – європейський стандарт вибухозахищеного обладнання, скорочення від Atmospheres Explosibles (вибухонебезпечні суміші газів). Вимоги ATEX поширюються на механічне, електричне обладнання та захисні засоби, які передбачається використовувати в потенційно вибухонебезпечних умовах, як під землею, так і на поверхні землі [43]. У стандарті ATEX посилені вимоги стандартів EN50020 / EN50014 в частині IS (Intrinsically Safe) обладнання. Ці посилення передбачають:

- обмеження ємнісних параметрів схеми;
- використання інших класів захисту;
- нові вимоги до електростатики;
- використання захисного шкіряного чохла.

Зони АTEX класифікуються відповідно до двох параметрів. Перший - це тип горючої речовини, яка може бути присутня, пил або газ. Другий - період часу в році, протягом якого в даній зоні може утворитися вибухонебезпечна атмосфера. Зона, до якої треба віднести розташування розробленого електротехнічного комплексу, це **зона 0** (присутність газу постійно або тривалий період часу- понад 1000 годин на рік), клас обладнання II 1G. Оскільки температура займання метану складає 595 – 750 °С , електрообладнання віднесено до температурного класу T1. Відповідно для вузлів, розташованих в ізотермічному контейнері вбираємо рівень вибухозахисту Ex-і, який означає, що електрична енергія всередині пристрою обмежена до рівня, який не може спричинити займання або нагрівання поверхні пристрою. Для ПЕМП вбираємо "Ia" - найвищий тип захисту, призначений для використання в зоні 0, при якому захист від займання гарантується навіть при виникненні комбінації двох несправностей під час роботи.

Мета розрахунку іскробезпечності полягає в тому, щоб переконатися, що вибрана комбінація іскробезпечного апарату, пов'язаного з ним апарату та з'єднувальних кабелів утворює іскробезпечний контур, який можна використовувати у вибухонебезпечній зоні. Вибухобезпечне виконання крокових двигунів є важливим аспектом у промислових застосуваннях, де можливе виникнення вибухонебезпечних сумішей газів чи пилу. Для забезпечення безпеки в таких умовах крокові двигуни повинні відповідати спеціальним вимогам та стандартам.

Для крокового двигуна з напругою 12В, струмом 1,7 А і індуктивністю 0,003 Гн розрахована можлива енергія підпалу. Це енергія, що запасасться в індуктивності під час зростання струму та повертається в коло при його зменшенні (ефект магнітної інерції):

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{0,003 \cdot 1,7^2}{2} = 0,0043 \text{ Дж}$$

Енергія підпалу метану (CH₄) визначається як кількість тепла, що необхідна для ініціювання реакції згорання метану в присутності кисню. У більшості випадків ця

енергія дуже маленька і вважається, що вона становить близько 0,6-1,2 кДж/моль залежно від умов. Для водню енергія підпалу становить менше 60 мкДж. Отже, для крокового двигуна доцільно вибрати вибухобезпечний варіант виконання. Такі рішення пропонують відомі виробники Siemens, Parker Hannifin, Schneider Electric, Baldor Electric Company, Kollmorgen (серія MX) [44, 45].

Обґрунтування режимів роботи електроприводів пристрою для автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння

Надійна робота пристрою для автоматичного контролю (ПАК) в умовах агресивного середовища та тривалої автономної експлуатації вимагає ретельного обґрунтування вибору виконавчих механізмів. Кінематична схема пристрою, яка захищена патентом [38], передбачає наявність двох основних вузлів руху:

- вузол *вертикального переміщення* забезпечує спуск та підйом каретки з датчиками для занурення в субстрат та виведення в зону обслуговування;
- вузол *герметизації* забезпечує відкривання та закривання захисних ковпачків.

Специфіка роботи цих вузлів (необхідність точного позиціювання, робота на низьких швидкостях, утримання навантаження, робота в умовах підвищеної вологості, можливого забруднення та необхідності високої точності позиціювання) обумовлює доцільність використання крокових електродвигунів. У цьому підрозділі проведено теоретичне дослідження режимів їх роботи та розрахунок необхідних енергетичних характеристик для вибору оптимальних типорозмірів двигунів та драйверів керування.

Методика розрахунків параметрів навантаження крокового електродвигуна в системі автоматичного контролю параметрів анаеробного бродіння

Основним виконавчим механізмом, що забезпечує вертикальне переміщення блоку сенсорів (занурення та підйом), є кроковий електродвигун. Вибір на користь крокового приводу обумовлений необхідністю точного позиціювання датчиків на заданій глибині без використання складних систем зворотного зв'язку (енкодерів).

На рис.Л.1, рис.Л.2 окремо представлено вузол рухомої каретки пристрою для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах. Рух каретки з закріпленими на ній виносними на кабелі давачами вимірювальних приладів забезпечується електроприводом з зубчасто-пасовою передачею на основі крокового двигуна 1.

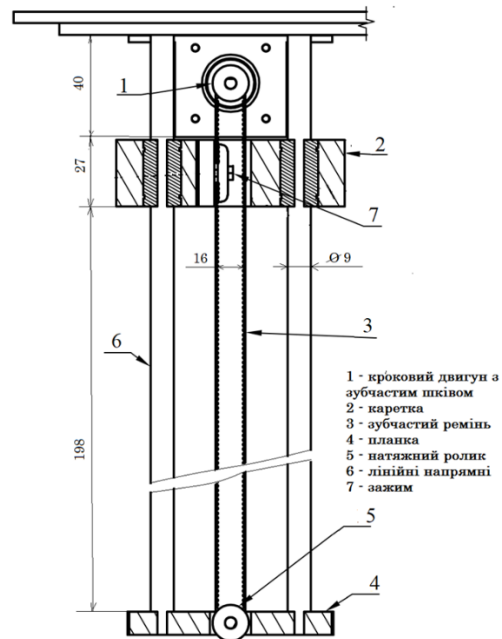


Рис.Л.1. Вузол рухомої каретки пристрою для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах

Джерело: розроблено автором.



а)



б)

Рис. Л.2. Каретка з давачами вимірювальних приладів, над субстратом (а) та занурена у субстрат (б).

Джерело: розроблено автором.

Для вибору крокового двигуна необхідно визначити параметри навантаження на валу та з'ясувати, який профіль швидкості повинен мати кроковий двигун, щоб виконувати кутовий рух, необхідний у даній конкретній області застосування, протягом заданого періоду часу.

З урахуванням визначеної комплектації і розмірів вузла рухомої каретки пристрою запропонована методика розрахунків параметрів навантаження крокового двигуна у складі пристрою для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах. Для перетворення обертального руху валу двигуна у лінійний рух каретки розглянуто два варіанти кінематичних передач:

1. Передача «гвинт-гайка» (leadscrew).
2. Пасова передача із зубчастим ременем (timing belt).

Проведемо порівняльний розрахунок навантажувальних характеристик для обох варіантів.

Розрахунок сил опору. Сумарне зусилля F_{Σ} , яке повинен подолати привід при підйомі каретки, складається з сили тяжіння, сили тертя в напрямних, сили тертя в зубчато-пасовій передачі і сили інерції при плавному розгоні:

$$F_{\Sigma} = F_g + F_{fr} + F_{ftb} + F_a \quad (\text{Л.1})$$

де F_g - сила тяжіння; F_{fr} - сила тертя в напрямних; F_{ftb} - сили тертя в зубчато-пасовій передачі; F_a - сили інерції.

Складові сумарного зусилля F_{Σ} визначаємо за такими співвідношеннями:

$$F_g = m \cdot g, \quad (\text{Л. 2})$$

$$F_{fr} = \mu \cdot N, \quad (\text{Л.3})$$

$$M_{ftb} = M_{vkh} \cdot (1 - \eta), \quad (\text{Л.4})$$

$$F_{ftb} = M_{ftb}/r, \quad (\text{Л.5})$$

$$F_a = m \cdot a, \quad (\text{Л.6})$$

де m - маса рухомої частини (каретка + датчики + кріплення), кг; g - прискорення вільного падіння ($9,81 \text{ м/с}^2$); μ - коефіцієнт тертя ковзання в напрямних (для пари «сталь-полімер» або лінійних підшипників $\mu \approx 0,1 - 0,2$); N - сила нормального тиску в напрямних (у вертикальному положенні визначається перекосом каретки, прийmemo $N \approx 0,2 \cdot F_g$); M_{ftb}, M_{vkh} - відповідно момент тертя в зубчасто-пасовій передачі і вхідний крутний момент крокового двигуна; η - ККД передачі (для зубчасто-пасової передачі $\eta = 0,96 \dots 0,98$); a - прискорення при розгоні (прискорення при плавному розгоні $a = 0,5 \text{ м/с}^2$).

Розрахунок моменту для зубчасто-пасової передачі. Використовується шків GT2, закріплений безпосередньо на валу двигуна. Необхідний момент M_{belt} визначається радіусом шківа:

$$M_{belt} = \frac{F_{\Sigma} \cdot D_p}{2 \cdot \eta_{belt}}, \quad (Л.7)$$

де D_p - дільний діаметр шківа (для шківа GT2 20 зубів $D_p \approx 12,7 \text{ мм} = 0,0127 \text{ м}$); η_{belt} - ККД зубчасто-пасової передачі.

$$M_{belt} = \frac{10,7 \cdot 0,0127}{2 \cdot 0,9} \approx 0,075 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При номінальному моменті двигуна NEMA 17 на рівні $0,45 \text{ Н} \cdot \text{м}$, коефіцієнт запасу становить:

$$k = \frac{0,4}{0,075} \approx 5,3$$

Переваги:

1. Висока швидкість переміщення, що скорочує час циклу вимірювання.
2. Конструктивна простота та стійкість до забруднень (відсутність мастила, яке збирає бруд).
3. Відсутність ефекту заклинювання при незначному забрудненні напрямних.

Недоліки: Відсутність самогальмування. При вимкненні струму утримання каретка під дією ваги опуститься вниз.

Розрахунок моменту для передачі «гвинт-гайка». Перетворення обертового руху на лінійне можна здійснювати безпосередньо в самому двигуні. Передача «гвинт-гайка» характеризується високою редуцією зусилля, що дозволяє підіймати значні вантажі двигунами малої потужності. Необхідний обертовий момент M_{screw} визначається за формулою:

$$M_{screw} = \frac{F_{\Sigma} \cdot d_m}{2} \cdot \tan(\lambda + \phi) \quad (Л.8)$$

де d_m - середній діаметр різьби (для гвинта Т8: $d_m \approx 7$ мм); λ - кут підйому різьби; ϕ - кут тертя.

При розрахунках сумарного зусилля F_{Σ} для передачі «гвинт-гайка» не враховується сили тертя в зубчасто-пасовій передачі.

Спрощена формула для інженерних розрахунків (з урахуванням ККД $\eta \approx 0,3 - 0,4$ для трапецеїдальної різьби):

$$M_{screw} = \frac{F_{\Sigma} \cdot P}{2\pi \cdot \eta}$$

де P - крок різьби (для Т8 зазвичай $P = 8$ мм при чотиризахідній різьбі, або 2 мм при однозахідній).

Для параметрів $P = 8$ мм (0,008 м) та $\eta = 0,4$ величина моменту передачі «гвинт-гайка» дорівнює:

$$M_{screw} = \frac{10,7 \cdot 0,008}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4} \approx 0,034 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

У якості базової моделі обрано біполярний лінійний кроковий двигун NEMA 17 з ходовим гвинтом Т8 100-300 мм (стандартний момент утримання 0,4-0,5 Н·м), який широко використовується в засобах автоматизації завдяки своїй доступності та надійності (рис.Л.3). Цей вибір обумовлений високим співвідношенням крутного моменту до маси, доступністю та сумісністю зі стандартними драйверами керування, такими як А4988.



Рис.Л.3. Лінійний кроковий двигун NEMA 17 з ходовим гвинтом

Джерело: [40]

При номінальному моменті двигуна NEMA 17 на рівні $0,45 \text{ Н} \cdot \text{м}$, коефіцієнт запасу становить:

$$k = \frac{0,4}{0,045} \approx 8,8$$

Переваги:

1. Високий вигреш у силі (момент двигуна використовується на 10-20% від номіналу).
2. Ефект самогальмування (для гвинтів з малим кроком), що утримує каретку при знеструмленні.

Недоліки:

1. Низька швидкість переміщення.
2. Критична чутливість до забруднень. В умовах біореактора потрапляння парів субстрату, пилу або бризок на змащену різьбу перетворює мастило на абразивну пасту, що призводить до різкого зростання коефіцієнта тертя, заклинювання гайки та пропуску кроків двигуна.

Вибір механічної передачі. Для реалізації вузла переміщення в пристрої ПАК обрано пасову передачу, незважаючи на те, що система «гвинт-гайка» потребує меншого крутного моменту. Визначальним фактором стала надійність роботи в агресивному середовищі, де ризик заклинювання гвинтової пари є неприпустимим. Використання зубчастого ременя забезпечує п'ятикратний запас по моменту, що гарантує стабільний рух навіть при можливому збільшенні тертя в напрямних. У

якості зубчастого шківа крокового двигуна і натяжного ролика застосовано шків GT2 із внутрішнім діаметром 5 мм, виготовлений із високоякісної легованої сталі, водонепроникний та нержавіючий, а також має високу міцність для тривалого використання. Шків має крок 2 мм, кількість зубів 20T, зовнішній діаметр: 21 мм, подвійний фланець. Для точної передачі руху обрано зубчастий ремінь GT2 (ширина 6 мм, довжина 540 мм) з синтетичного каучуку, армованим скловолокном, який забезпечує низький рівень шуму, відсутність люфтів та високу зносостійкість. Цей ремінь має напівкруглий профіль зубів з кроком 2 мм, що забезпечує високу точність позиціонування.

Розрахунок максимальної швидкості, мінімального часу на крок та максимальної потужності крокового двигуна. За результатами розрахунку моменту навантаження для зубчасто-пасової передачі визначено необхідний момент M_{belt} , орієнтуючись на який можна запропонувати наступні моделі крокових двигунів типорозміру NEMA17: модель 17HS4401S; модель 17HD6012N; модель 17HD40005-22B. В таблиці Л.1. представлено порівняльний аналіз технічних параметрів і характеристик вказаних моделей. Ми обираємо біполярні двигуни, які мають вищий момент та кращу ефективність. За рівнем робочої температури можливо обрати відповідну модель крокового двигуна для використання в умовах мезофільного або термофільного режимів роботи біореактора.

Таблиця Л.1

Технічні параметри крокових двигунів

Параметри та характеристики	Модель		
	17HS4401S	17HD6012N	17HD40005-22B
Кількість фаз	2	2	2
Номінальний струм фази, А	1.7	1.5	1.5
Крок, град	1.8°	1.8°	1.8°
Кількість кроків на оберт	200	200	200
Опір фази, Ом	1.5	2	1.6
Індуктивність фази,	2.8	4.5	3.8

мГн			
Крутний момент, Н·м	0.42	0.44	0,42
Момент утримання, Н·м	0,392	0.49	0,42
Момент фіксації, Н·м	–	0,025	0,018
Початковий момент на низьких швидкостях	0,4 -0,45 на швидкостях до 300- 500 об/хв	0,4-0,5 на швидкостях до 300- 500 об/хв	0,4-0,5 на швидкостях до 300- 500 об/хв
Пускова частота, Гц (кроків/сек)	600-1000	600-1000	600-1000
Рекомендовані драйвери При напрузі живлення 12 В При напрузі живлення 24 В	A4988, TMC2208 Стабільно працює до 500-800 об/хв. Крутний момент на високих швидкостях стає вищим.	A4988, TMC2208 Стабільно працює до 500-800 об/хв. Крутний момент на високих швидкостях стає вищим.	A4988, TMC2208 Стабільно працює до 500-800 об/хв. Крутний момент на високих швидкостях стає вищим.
Діаметр валу, мм	5	5	5
Довжина валу, мм	20	20	22
Довжина кабелів, м	0,8	0,8	1.0
Робоча температура, °С	20°С...+50°С	20°С...+65°С	-20°С до +85°С
Опір ізоляції, МОм	100	100	100
Клас ізоляції	В	В	В
Діелектрична міцність (вольт змінного струму протягом хвилини)	500	500	500
Момент інерції ротора, г·см ²	54–65	82	54–65

Здійснюємо розрахунки максимальної швидкості n (об/хв), кількості імпульсів за секунду (pps), що подаються на двигун, мінімального часу на крок $t_{кр}$ та максимальної потужності $P_{макс}$ крокового двигуна за формулами:

$$n = \frac{U}{2L \cdot I_{макс} N} \times 60, \quad (Л.9)$$

$$f = \frac{n \cdot N \cdot \mu}{60}, \quad (Л.10)$$

$$t_{кр} = \frac{2L \cdot I_{макс}}{U}, \quad (Л.11)$$

$$P_{макс} = I_{макс} \cdot U, \quad (Л.12)$$

де U – прикладена напруга, В; L – індуктивність фази крокового двигуна; $I_{макс}$ – максимальний струм, А; N – кількість кроків на оберт; μ – коефіцієнт мікрокроку (1, 1/2, 1/4).

Список опублікованих праць за темою дисертації
Статті у наукових виданнях, включених до міжнародних
наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Zablodskiy, M., Klendiy, P., Dudar, O., & **Babak, D.** (2024). Energy Efficiency of the Extrusion Process and its Effect on Output of Biogas during the Fermentation of Maize and Rape Straw. *Problemele Energeticii Regionale*, 61(1), 127-139. DOI: doi.org/10.52254/1857-0070.2024.1-61.11 (*Zablodskiy, M. розробив програму дослідження та відредагував статтю, Klendiy, P. провів експериментальні дослідження і моделювання, Dudar, O. здійснила підготовку проб для дослідження та оформила статтю, Babak, D. розробив імітаційну модель і виконав обробку експериментальних даних*)

2. Zablodskyi 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: 10.31548/machinery/2.2025.58 (*Zablodskiy, M. розробив програму дослідження та відредагував статтю, Babak, D. розробив математичну модель, виготовив дослідний зразок, провів експериментальні дослідження та моделювання*)

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань
України

3. Заблодський М. М., **Бабак Д. О.** Концепція побудови електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора. *Енергетика і автоматика*, № 1 (2026), 64-74. [https://doi.org/10.31548/energiya1\(83\).2026.064](https://doi.org/10.31548/energiya1(83).2026.064) (*Заблодський М. М., розробив підконцепцію перетворення енергії в заглибному поліфункціональному перетворювачі, підготував статтю до друку, Бабак Д. О. розробив підконцепції бездротового внутрішнього моніторингу та автоматизованого фізико-хімічного контролю електротехнічного комплексу моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора*).

4. **Бабак Д. О.** Дослідження обертового трансформатора системи моніторингу та регулювання режиму роботи біогазового реактора. *Енергетика і автоматика*, № 2 (2026), 107-118 DOI: 10.31548/energiya2(84).2026.107

Тези наукових доповідей

5. **Бабак Д.О.**, Заблодський М.М. Інформаційні технології й альтернативна енергетика в епоху розвитку інновацій та штучного інтелекту: Аналіз впливу змінних навантажувальних умов на ефективність і продуктивність роботи помпи: Освіта і наука в умовах викликів і загроз. Внесок молодих вчених в сталий розвиток, м. Київ, 21 листопада 2024 року: тези доповіді. С. 362–363. *(Бабак Д.О. розробив макетний зразок і провів експериментальні дослідження навантажувальних характеристик, Заблодський М.М. здійснив наукове консультування та валідацію технічних рішень)*.

6. **Бабак Д.О.**, Заблодський М.М. Управління енергоефективністю технологічних комплексів: Використання обертового трансформатора в системі дистанційного моніторингу температурного режиму біореактора: III Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності», м. Київ, 6 червня 2025 року: тези доповіді. С. 120–121. *(Бабак Д.О. розробив макетний зразок і провів експериментальні дослідження обертового трансформатора в системі дистанційного моніторингу, Заблодський М.М. здійснив наукове консультування та перевірку коректності технічних рішень)*

7. **Бабак Д.О.**, Заблодський М.М. Проблеми теорії і практики електричних машин: Система дистанційного моніторингу стану заглибного електромеханічного перетворювача на основі обертового трансформатора: Міжнародний симпозіум «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA'2025), м. Харків, 30 жовтня 2025 року: тези доповіді. С. 120–121. *(Бабак Д.О. розробив макетний зразок і провів експериментальні дослідження системи дистанційного моніторингу стану заглибного електромеханічного перетворювача, Заблодський М.М. здійснив наукове консультування та перевірку коректності технічних рішень)*

8. **Бабак Д.О.**, Заблодський М.М. Система вимірювання параметрів обертової частини заглибного електромеханічного перетворювача для автоматичного керування процесом анаеробної ферментації. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми сучасної енергетики», Київ, 2025р. С.95-96. *(Бабак Д.О. розробив макетний зразок і провів експериментальні дослідження, Заблодський М.М. здійснив наукове консультування та узагальнив результати)*

Патенти України

9. Патент України № 155766. Пристрій для автоматичного контролю параметрів процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах/ Заблодський М.М., **Бабак Д.О.**, Троханяк В. І., Шворов С. А. Опубл. 03.04.2024, Бюл. № 14. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1791043/> (Заблодський М.М. оформлено заявку на корисну модель; Бабак Д.О. взято участь у виготовленні макетного зразка і виконанні досліджень, виконано статистичну обробку даних та підготовлено матеріали до патентування; Троханяк В. І. взято участь у виконанні досліджень; Шворов С. А. взято участь у пошуку прототипу для оформлення патенту)