

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ**І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ****ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ****ПОГОДЖЕНО****Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження****проф., д.т.н.** _____ **КАПЛУН В.В.**
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій****доц., к.т.н.** _____ **ОКУШКО О.В.**
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**на тему: «Дослідження характеристик електромеханічного вузла системи контролю параметрів субстрата біогазового реактора»****Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка****Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна**Гарант освітньої програми**_____ **к.т.н., доцент**
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)**Усенко С.М.**
(ПІБ)**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**_____ **Д-р техн.наук, професор**
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)**Заблодський М.М.**
(ПІБ)**Виконав** _____

(підпис)

Бобошко В.М.
(ПІБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій**

к.т.н., доц.

Окушко О.В.

(підпис)

« _____ » 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Бобошко Владислав Миколайович

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження характеристик електромеханічного вузла системи контролю параметрів сустрата біогазового реактора»

затверджена наказом від 18.11.2024 № 2061”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14. 11 .

2025 Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

- Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз сучасного стану досліджень по вдосконаленню процесів анаеробного бродіння при виробництві біогазу.
2. Теоретичне обґрунтування побудови електромеханічних вимірювальних вузлів.

3. Конструкторське опрацювання електромеханічного вузла системи контролю параметрів субстрата біогазового реактора.
4. Проведення експериментальних досліджень характеристик електромеханічного вузла.
5. Розробка заходів з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) Презентація, наочні матеріали з результатами досліджень, розрахунки і таблиці з отриманими результатами.

Дата видачі завдання «19» листопада .2024 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Заблодський М. М.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Бобошко В.М.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 85с., 16 рис., 6 табл., 61 джерел.

Об'єктом дослідження є процеси контролю фізико-хімічних параметрів субстрату в біогазовому реакторі та функціонування електромеханічних вузлів систем автоматизації, що забезпечують стабільну роботу установки.

Предметом дослідження є характеристики електромеханічного вузла системи контролю параметрів субстрату, зокрема точність вимірювання, стабільність роботи та взаємодія з іншими елементами автоматизованої системи.

Мета дослідження мета даної роботи полягає у комплексному дослідженні характеристик електромеханічного вузла системи контролю параметрів субстрату біогазового реактора, що дозволить визначити його працездатність, точність вимірювань та стійкість до експлуатаційних навантажень. Виконане дослідження також передбачає оцінку можливостей вдосконалення конструкції вузла з метою підвищення ефективності та надійності системи в цілому.

Наукова новизна роботи полягає у розробці та апробації методики дослідження електромеханічного вузла, що забезпечує контроль ключових параметрів субстрату біогазового реактора, та виявленні закономірностей, які впливають на точність вимірювань і стабільність роботи системи.

Практична значимість дослідження полягає у можливості впровадження отриманих результатів у промислові біогазові установки для підвищення їх продуктивності та надійності, а також для розробки рекомендацій щодо модернізації існуючих систем контролю.

Ключові слова: біогазовий реактор, електромеханічний вузол, автоматичний контроль, ферментація, температура, рН, моніторинг, енергоефективність, моделювання, безпека.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	10
1.1. Огляд принципів роботи біогазових реакторів та їх енергоефективність ..	10
1.2. Основні параметри субстрата	15
1.3. Системи моніторингу та контролю в біогазових установках.....	18
1.4. Аналіз існуючих електромеханічних вузлів для вимірювання параметрів.	22
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	27
2.1. Принципи побудови електромеханічних вимірювальних вузлів.....	27
2.2. Математичне моделювання процесів у біогазовому реакторі.....	33
2.3. Вибір фізичних величин для контролю та їх вплив на ефективність ферментації.....	36
2.4. Вибір фізичних величин для контролю та їх вплив на ефективність ферментації.....	39
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКЕ ОПРАЦЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ВУЗЛА	43
3.1. Загальна структурна схема системи контролю параметрів субстрата.	43
3.2. Схемотехнічні рішення та електронна частина вузла	45
3.3. Розробка алгоритму роботи вузла та програмного забезпечення.....	47
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ВУЗЛА	50
4.1. Вибір та обґрунтування типу електромеханічного вузла	50
4.2. Конструктивна схема та принцип дії розробленого вузла.....	52
4.3. Опис лабораторної установки та методики експерименту	55
4.4. Експериментальне визначення метрологічних характеристик	58
4.4.1. Статична характеристика та похибка вимірювання	59

4.4.2. Чутливість та нелінійність	60
4.4.3. Динамічні характеристики (час встановлення, перерегулювання).....	61
4.5. Дослідження стійкості вузла до експлуатаційних факторів біогазового середовища (температура 35–60 °С, агресивні гази, вологість).....	62
4.6. Порівняльний аналіз з існуючими промисловими аналогами.....	64
4.7. Рекомендації щодо впровадження та подальшого вдосконалення.....	67
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	69
5.1. Нормативно-правові вимоги з охорони праці.	69
5.2. Безпека при експлуатації біогазових установок.	73
5.3. Електробезпека та захист від ураження струмом.	76
5.4. Аналіз потенційних надзвичайних ситуацій та заходи їх попередження.	78
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:.....	87

ВСТУП

Сучасна енергетика стикається з необхідністю впровадження альтернативних та відновлюваних джерел енергії, серед яких особливе місце займає біогаз. Використання біогазових установок дозволяє не лише отримувати енергію з органічних відходів, але й вирішувати питання утилізації побутових, сільськогосподарських та промислових відходів, зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

Ефективність роботи біогазового реактора залежить від багатьох факторів, серед яких особливо важливим є точний контроль параметрів субстрату: температури, вологості, рН та концентрації біогазу. Для забезпечення стабільного та безпечного функціонування реактора використовуються електромеханічні вузли, що інтегруються у системи автоматичного контролю. Надійність та точність цих вузлів безпосередньо впливають на продуктивність біогазової установки, якість біогазу та ефективність процесів анаеробного бродіння.

Сучасна енергетика та екологія стикаються із необхідністю зменшення залежності від викопних джерел енергії та одночасного ефективного використання органічних відходів. Біогазові реактори є одним із ключових інструментів вирішення цих проблем, оскільки вони дозволяють отримувати відновлювану енергію та переробляти побутові, сільськогосподарські та промислові відходи, знижуючи їх негативний вплив на навколишнє середовище.

Проте ефективність роботи біогазового реактора значною мірою залежить від точного контролю фізико-хімічних параметрів субстрату, таких як температура, рН, вологість та концентрація газових компонентів. Недостатньо точне вимірювання або нестабільна робота систем контролю можуть призвести до зниження продуктивності реактора, зменшення виходу біогазу та підвищення ризику технологічних аварій.

В умовах зростаючого попиту на енергію з відновлюваних джерел та розвитку сучасних промислових біогазових установок стає критично важливим створення надійних та високоточних електромеханічних вузлів для контролю параметрів субстрату. Вивчення їх характеристик, оцінка точності та стійкості до експлуатаційних навантажень дозволяє підвищити ефективність біогазових систем, оптимізувати виробничі процеси та забезпечити стабільну роботу установок у різних умовах.

Мета даної роботи полягає у комплексному дослідженні характеристик електромеханічного вузла системи контролю параметрів субстрату біогазового реактора, що дозволить визначити його працездатність, точність вимірювань та стійкість до експлуатаційних навантажень. Виконане дослідження також передбачає оцінку можливостей вдосконалення конструкції вузла з метою підвищення ефективності та надійності системи в цілому.

Наукова новизна роботи полягає у розробці та апробації методики дослідження електромеханічного вузла, що забезпечує контроль ключових параметрів субстрату біогазового реактора, та виявленні закономірностей, які впливають на точність вимірювань і стабільність роботи системи.

Практична значимість дослідження полягає у можливості впровадження отриманих результатів у промислові біогазові установки для підвищення їх продуктивності та надійності, а також для розробки рекомендацій щодо модернізації існуючих систем контролю.

Об'єктом дослідження є процеси контролю фізико-хімічних параметрів субстрату в біогазовому реакторі та функціонування електромеханічних вузлів систем автоматизації, що забезпечують стабільну роботу установки.

Предметом дослідження є характеристики електромеханічного вузла системи контролю параметрів субстрату, зокрема точність вимірювання, стабільність роботи та взаємодія з іншими елементами автоматизованої системи.

Обсяг роботи 84 сторінки А4 формату. Робота складається з 5 розділів та підрозділів до них.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Огляд принципів роботи біогазових реакторів та їх енергоефективність

Біогаз — це газоподібна суміш, що утворюється в результаті водневого або метанового бродіння органічної біомаси. Метаногенний розклад біомаси відбувається за участю трьох груп бактерій, кожна з яких живиться продуктами життєдіяльності попередньої. Першу групу складають гідролізні бактерії, які розщеплюють складні органічні речовини, другу — бактерії, що утворюють органічні кислоти, а третю — метаноутворюючі бактерії, які продукують метан.

Процес генерації газу відбувається в анаеробних умовах, тобто без доступу кисню, і є результатом активної діяльності мікроорганізмів, що супроводжується низкою біохімічних реакцій. За хімічним складом біогаз переважно містить метан у кількості від 50 до 85%, вуглекислий газ — від 15 до 50%, а також незначні домішки інших газів.

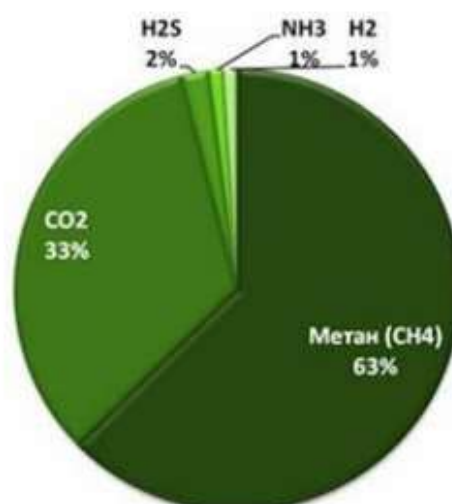


Рис.1.1. – Склад біогазу у відсотковому співвідношенні

Біогаз за своїми властивостями найбільше наближений до природного газу: він прозорий та не має запаху. Його можна використовувати для спалювання у котлах або двигунах внутрішнього згорання без попереднього збагачення, при цьому найпоширенішим застосуванням біогазу є виробництво електричної енергії [1, с. 56-58].

Процес метанового розкладу біомаси можна поділити на чотири ключові етапи:

Перший етап – гідроліз: аеробні гідролізні бактерії перетворюють високомолекулярні органічні речовини (білки, жири, вуглеводи, целюлозу) на низькомолекулярні сполуки, такі як амінокислоти, жирні кислоти, прості цукри та воду. Цей процес здійснюється за допомогою ферментів, прикріплених до зовнішніх мембран бактерій (екзоферменти), що розщеплюють полімери на одномери. Швидкість гідролізу залежить від дії позаклітинних ферментів (амілази, протеази, ліпази) та умов середовища, зокрема рівня рН і часу перебування біомаси в реакторі.

Другий етап – кислототворення: кислотоутворюючі бактерії продовжують розщеплення органічних сполук, деякі молекули проникають у клітини бактерій. Частково на цьому етапі беруть участь аеробні мікроорганізми, які споживають залишковий кисень, забезпечуючи анаеробні умови для метаногенів. При рівні рН 6–7,5 утворюються нестійкі жирні кислоти (оцтова, масляна, мурашина, пропіонова), низькомолекулярні спирти (етанол), вуглець і газ (CO_2 , H_2 , H_2S , NH_3). Цей етап називають фазою окислення, при якій рівень рН знижується.

Третій етап – воднепродукуючі бактерії перетворюють органічні кислоти на продукти, необхідні для синтезу метану: оцтову і мурашину кислоти, водень та вуглекислий газ. Ці бактерії дуже чутливі до температурних змін, що впливає на швидкість утворення метану.

Четвертий етап – метаногенез: метаноутворюючі бактерії з оцтової і мурашиної кислот, водню та вуглецю продукують метан, CO_2 і воду. На цьому

етапі формується близько 90% всього метану, причому приблизно 70% утворюється з оцтової кислоти. Таким чином, продукція оцтової кислоти на попередньому етапі визначає ефективність метаногенезу. Важливо відзначити, що метаноутворюючі бактерії є строго анаеробними [2, с. 34-38].

У процесі розщеплення органічних речовин продукти обміну кожної групи бактерій слугують живильним середовищем для наступної групи мікроорганізмів. Оскільки бактерії здатні переробляти речовини лише у розчиненому вигляді, розкладання органіки та подальше утворення метану відбувається виключно у вологому середовищі, що обумовлює необхідність додавання води при бродінні твердих субстратів.

Для ефективного перебігу метанового бродіння органічних речовин виділяють чотири ключові умови:

1. підтримання оптимальної температури бродильної маси;
2. забезпечення безкисневого середовища;
3. наявність метаногенних бактерій;
4. підтримка слаболужної реакції середовища.

Температура є критично важливим чинником для життєдіяльності метаноутворюючих бактерій, які поділяються на три групи: термофільні (55–60 °C), мезофільні (30–35 °C) та психрофільні (5–20 °C). Вихід метану можливий лише в анаеробних умовах, тому ферментація проводиться у спеціальних герметичних резервуарах [3].

Метаногенна ферментація неможлива без присутності відповідних мікроорганізмів. Метаногени розвиваються тільки в анаеробному середовищі з слаболужною реакцією (оптимальний рН 7–7,5). Надто лужне середовище може стимулювати патогенне гниття та виділення сірководню, а надто кисле – блокувати утворення біогазу.

Ще одним важливим параметром є співвідношення вуглецю до азоту (C:N) у субстраті, що впливає на розвиток метаногенних культур. Мікроорганізми споживають вуглецю у 20–35 разів більше, ніж азоту (залежно

від рН), тому оптимальним вважається співвідношення С:N = 30:1. Наприклад, при використанні пташиного посліду як субстрату, за цього співвідношення спостерігався вихід метану до 70 % при рН = 7 та обсяг біогазу до 300 л/г сухої речовини при температурі 35 °С. Критичним значенням вважається С:N = 8:1, оскільки нижче цього рівня токсичні сполуки амонію пригнічують розвиток мікроорганізмів. Оптимальне співвідношення С:N дозволяє визначити раціональну пропорцію пташиного посліду та целюлозовмісних відходів для забезпечення стабільного та ефективного процесу метаногенезу.

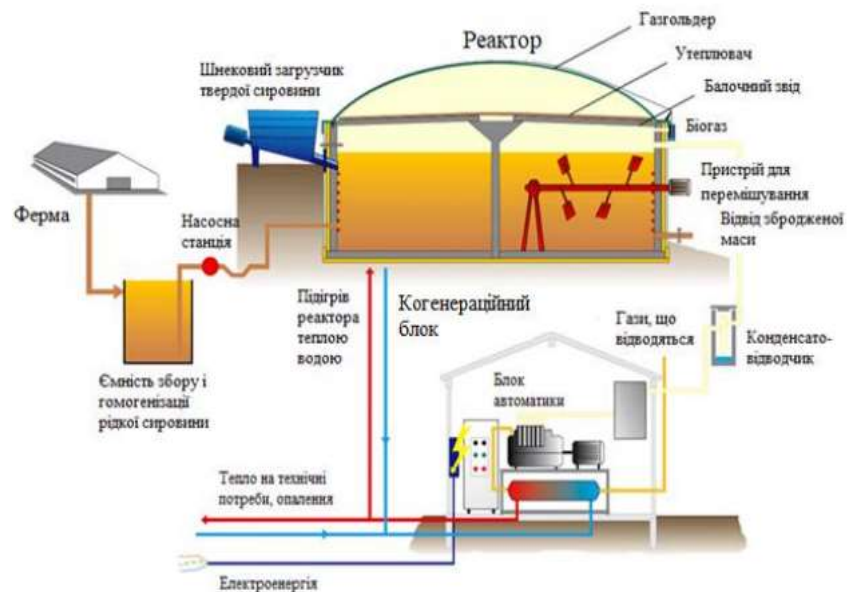


Рис.1.2. – Схема біогазової установки

Біогазова установка включає такі основні компоненти: [4, с. 23-28].

- Перехідна ємність, куди спочатку подається сировина для її попереднього підігріву;
- Міксери, що подрібнюють великі частки гною та посліду;
- Газгольдер, який служить для зберігання виробленого газу та підтримки його запасу і тиску в системі;
- Біореактор, ключовий елемент установки, де відбувається бродіння органічної сировини і вироблення газу;

- Газова система, яка включає труби та шланги для подачі і відведення біогазу;
- Сепаратори, що розділяють перероблену сировину на рідкі та тверді добрива;
- Насоси для перекачування сировини та води;
- Прилади контролю, що вимірюють тиск у реакторі та температуру підігрітої рідини;
- Когенераційна станція, яка забезпечує розподіл отриманого газу;
- Аварійні пальники, що служать для видалення надлишкового газу з реактора та газгольдера, підтримуючи стабільний тиск.

Принцип роботи біогазової установки включає кілька етапів:

Подача сировини. Відходи доставляються в установку, причому рідкі можна подавати насосами, а тверді – вручну або транспортною стрічкою. Для прискорення процесу бродіння часто застосовують підігрів сировини у перехідній ємності до необхідної температури.

Переробка в біореакторі. Підігріта сировина потрапляє у герметичний біореактор, виготовлений із міцної сталі або бетону з антикислотним покриттям. Реактор ізольований термічно і газонепроникно – навіть невелике проникнення повітря або зниження температури здатне зупинити бродіння. Підігрів забезпечується гарячою водою, нагрітою за рахунок виробленого біогазу. Через герметичний реактор сировина перемішується спеціальним міксером для прискорення ферментації, а нові порції сировини додають кілька разів на день [5, с.120-127].

Після певного часу з'являються біогаз і біологічні добрива. Біогаз надходить у газгольдер, де його тиск контролюється клапанами, а надлишковий газ може спалюватися аварійними пальниками для стабілізації системи. Приблизно 15% виробленого газу використовується для підтримки роботи

установки. Рідкі та тверді добрива відокремлюються у сепараторі і готові до використання без додаткової обробки.

1.2. Основні параметри субстрата

Вихід біогазу безпосередньо залежить від вмісту сухої речовини (СР) та типу використовуваної сировини. Так, з однієї тонни курячого посліду отримують приблизно 50–65 м³ біогазу з часткою метану близько 60%. З 1 кг сухої речовини виробляють від 300 до 500 літрів біогазу [34].

Вміст сухої речовини у субстраті визначають за методикою, що відповідає стандарту, близькому до ДСТУ EN 12048:2005 [44]. Вміст золи у сухому залишку вимірюють відповідно до методики, наближеної до ГОСТ 26714-86 [45].

Вміст сухої органічної речовини (СОР) у субстраті обчислюють за формулою [46-47]:

$$СОР = \frac{m_{СР} - m_{золи}}{m_{субстрату}} \cdot 100\% \quad (1.1.1)$$

де

$m_{СР}$ – маса сухої речовини, г;

$m_{золи}$ – маса золи у сухому залишку, г;

$m_{субстрату}$ – маса свіжого субстрату, г.

Визначення СОР проводять як у свіжому субстраті, так і у збродженій масі [6].

Об'єм виробленого біогазу визначають методом витіснення еквівалентного об'єму рідини, спостерігаючи за переміщенням рухомої частини газгольдера. Об'єм біогазу приводять до нормальних умов для сухого газу [48]:

$$V_H = V_B \cdot (P_{лабо} - P_{парц}) \cdot T_H \cdot P_H \cdot T_{лаб} \quad (1.1.2)$$

де

T_H, P_H – температура та атмосферний тиск за нормальних умов;

$T_{лабо}, P_{лабо}$ – температура та тиск у лабораторії під час вимірювання;

V_v – об'єм біогазу за умов лабораторії;

$P_{\text{пари}}$ – тиск насиченої водяної пари [7].

Об'ємну частку вуглекислого газу в біогазі визначають хімічним газоаналізатором. Максимальна частка інших газів не перевищує 2,5 %, що робить метод придатним для оцінки концентрації метану.

Об'ємна концентрація метану у біогазі визначається за формулою:

$$C_{CH_4} = 100\% - C_{CO_2} \quad (1.1.3)$$

де

C_{CH_4} – об'ємна частка метану, %;

C_{CO_2} – об'ємна частка вуглекислого газу, %;

$C_{\text{інші}}$ – об'ємна частка інших газів, прийнята рівною 2,5 % [8].

З субстрату, для окиснення органічних речовин якого необхідно 1 г кисню, теоретично може утворитися близько 350 мл метану (CH_4) [50]. З урахуванням приросту клітинної біомаси, що для метанового бродіння складає приблизно 7 % [51], теоретичний метановий потенціал такого субстрату становить близько 325 мл CH_4 .

Максимальна швидкість утворення метану та тривалість лаг-фази визначаються шляхом апроксимації експериментальних даних математичною моделлю Гомпертца.

Кумулятивний вихід біогазу (V_{bg}) та об'єм метану (V_{CH_4}) протягом часу бродіння розраховують за формулами :

$$V_{bg} = \sum V_i V_{bg} \quad (1.1.4)$$

де V_i – об'єм біогазу, зафіксований при i -му знятті показів.

Інтенсивність утворення біогазу (q_{bg}) та метану (q_{CH_4}) в одиниці об'єму корисного об'єму реактора на момент часу визначаються за залежностями: [9]

$$q_{bg} = dV_{bg} V_{\text{реактора}} \cdot dt, \quad q_{CH_4} = dV_{CH_4} V_{\text{реактора}} \cdot dt \quad (1.1.5)$$

де $V_{\text{реактора}}$ – об'єм реактора, заповнений субстратом.

Частку сухої органічної речовини (COP) у свіжому субстраті, що розкладається під час бродіння, визначають як різницю між значенням COP у свіжому та переробленому субстратах [10]:

$$\Delta COP = COP_{\text{свіж}} - COP_{\text{переробл}} \quad (1.1.6)$$

З урахуванням приросту клітинної біомаси (7 % для метанового бродіння [51]), розраховують частку COP, яка конвертується у біогаз.

Ефективність переробки субстрату оцінюють за ступенями деструкції та конверсії COP. Ступінь деструкції визначають за формулою [46-47,52]:

$$\eta_{\text{дест}} = \frac{COP_{\text{свіж}} - COP_{\text{переробл}}}{COP_{\text{свіж}}} \cdot 100 \quad (1.1.7)$$

Ступінь конверсії COP із урахуванням приросту клітинної біомаси визначають як [11].

Вихід метану з органічних відходів та ступінь їх переробки оцінювали на основі зазначених припущень та експериментальних даних.

Вихід метану з відходів та ступінь їх переробки оцінювали з урахуванням наступних припущень:

- початковий вміст летких жирних кислот у рідкій фазі субстрату приймається за нуль;
- у процесі біологічної конверсії органічної речовини не враховуються синергетичні ефекти та незворотні зміни, тобто дотримується рівність:

$$V_{\text{CH}_4, \text{субстрат}} = V_{\text{CH}_4, \text{органічна речовина}} = V_{\text{CH}_4, \text{COP посліду}} + V_{\text{CH}_4} \quad [12] \quad (1.1.8)$$

де $V_{\text{CH}_4, \text{субстрат}}$ – об'єм метану, отриманого з субстрату;
 $V_{\text{CH}_4, \text{органічна речовина}}$ – об'єм метану, утвореного з органічної складової;
 $V_{\text{CH}_4, \text{COP посліду}}$ – об'єм метану, отриманого зі COP посліду;
 $V_{\text{CH}_4, \text{COP органічної речовини}}$ – об'єм метану зі COP органічної речовини;

- питомий вихід метану з переробленої сухої органічної речовини в усіх субстратах вважається однаковим.

Проаналізовано процес утворення біогазу з відходів птахівництва, його склад та основні характеристики. Встановлено, що для ефективного протікання

ферментації критичними є температура маси, анаеробне середовище, наявність метаногенних бактерій та слаболужна реакція середовища.

Розглянуто методики визначення характеристик субстратів та показників виходу біогазу. Виявлено, що об'єм виробленого біогазу залежить від вмісту сухої речовини (СР) у субстраті. Для оцінки об'єму біогазу використовується метод витіснення еквівалентного об'єму рідини. Теоретично, з субстрату, на окиснення органічних речовин якого необхідно 1 г кисню, може утворитися до 350 мл метану (CH_4). Максимальна швидкість утворення метану та тривалість лаг-фази оцінюються за допомогою апроксимації експериментальних даних математичною моделлю Гомпертца. Ефективність переробки субстрату характеризується ступенями деструкції та конверсії сухої органічної речовини.

1.3. Системи моніторингу та контролю в біогазових установках.

Основним інструментом для вивчення процесу метанового бродіння органічних речовин є поєднання математичного моделювання та експериментальних даних. Математична модель будь-якого біотехнологічного процесу зазвичай включає три ключові рівняння:

- рівняння, що описує ріст популяції мікроорганізмів;
- рівняння, що характеризує споживання субстрату;
- рівняння, що визначає утворення продуктів метаболізму [27–30].

Найбільш детально процес метанового бродіння описує модель ADM-1 [31], яка включає 32 змінні концентрацій, що відображають 19 біохімічних реакцій. Для практичного застосування цієї моделі необхідно провести значну кількість експериментів для визначення кінетичних параметрів, які впливають на умови бродіння [31].

Математичне моделювання метанового бродіння дозволяє прогнозувати концентрації субстратів, мікробних популяцій, поживних речовин та продуктів

метаболізму у будь-який момент часу всередині реактора біогазової установки.

Це забезпечує можливість:

- ефективно контролювати процес бродіння;
- розраховувати продуктивність установки та склад утвореного біогазу;
- визначати залежності виходу біогазу від технологічних параметрів процесу.

У роботі [15] запропоновано метод чисельного оцінювання виходу метану для реактора біогазової установки на основі результатів дослідження періодичного процесу бродіння [13, с. 45-49].

Для оцінки виходу та складу біогазу без урахування зростання мікробних популяцій найбільш зручно застосовувати модель Гомпертца [32, 33]:

$$V(t) = P \cdot \exp\left[-\frac{P}{R_{max} \cdot eP(\lambda - t) + 1}\right] V(t) \quad (1.1.9)$$

де $V(t)$ – вихід біогазу на одиницю об'єму реактора або на одиницю сухої органічної речовини (COP); P – метановий потенціал субстрату (COP); R_{max} – максимальна швидкість утворення метану на одиницю субстрату; λ – тривалість лаг-фази, діб; t – час бродіння, діб.

Ця модель дозволяє описати кінетику накопичення біогазу та прогнозувати його вихід без детального моделювання динаміки мікробних популяцій

Сучасні біогазові установки (БГУ) потребують постійного контролю та регулювання технологічних параметрів для забезпечення стабільного виробництва біогазу та ефективного розкладання субстрату. Системи моніторингу та контролю виконують ключову роль у забезпеченні безперервної та безпечної роботи установки.

Основні завдання систем моніторингу та контролю:

Контроль технологічних параметрів: [14].

- Температура субстрату в реакторі – критично важлива для життєдіяльності метаногенних мікроорганізмів;
- Рівень рН середовища – забезпечує оптимальні умови для ферментації;

- Тиск газу у газгольдері – для підтримки стабільного накопичення біогазу;
- Об'єм газу та його склад – концентрації метану, вуглекислого газу та інших домішок.

Автоматичне регулювання процесу:

- Підтримка заданої температури через систему підігріву;
- Регулювання перемішування субстрату для рівномірного бродіння;
- Автоматичне включення аварійних пальників у разі перевищення тиску;
- Дозування нових порцій субстрату та води для підтримки оптимальної вологості.
- Збір та аналіз даних:
- Фіксація показників температури, тиску, складу біогазу та рівня рН;
- Аналіз динаміки виробництва біогазу для оптимізації технологічного процесу;
- Побудова графіків і моделей прогнозування виходу газу.

Безпека та аварійне управління:

- Попередження перевищення критичних значень тиску та температури;
- Автоматичне відведення надлишкового газу;
- Сигналізація про небезпечні умови в реакторі та газгольдері.
- Механічні та електромеханічні датчики: вимірюють тиск, рівень рідини, температуру;
- Електронні та цифрові системи: сенсори рН, концентрації газів, автоматичне управління насосами та міксерами;
- Інтегровані програмно-апаратні комплекси: забезпечують централізоване керування всією установкою та ведення архіву даних.

Завдяки сучасним системам моніторингу та контролю значно підвищується ефективність роботи БГУ, оптимізується вихід біогазу та

зменшуються ризики аварій, що робить процес переробки органічних відходів більш безпечним та економічно вигідним [15].

Системи моніторингу та контролю відіграють ключову роль у забезпеченні стабільної та ефективної роботи біогазових установок. Вони поділяються на кілька основних типів залежно від принципу дії та рівня автоматизації. Перший тип включає механічні та електромеханічні датчики, які є базовими елементами контролю технологічних параметрів. До таких датчиків належать пристрої для вимірювання тиску, рівня рідини та температури. Датчики тиску контролюють газовий тиск у газгольдері та реакторі, сигналізуючи про перевищення безпечних значень і запобігаючи аварійним ситуаціям. Датчики рівня рідини дозволяють визначити об'єм субстрату в резервуарах, що забезпечує правильне дозування сировини та води і контролює ефективність перемішування. Датчики температури вимірюють температуру субстрату в реакторі, що критично важливо для нормальної життєдіяльності метаногенних бактерій, і зазвичай використовують терморпари або терморезистори, які оперативно реагують на зміни теплового режиму.

Другий тип систем – електронні та цифрові комплекси, які забезпечують більш точне та автоматизоване управління процесом ферментації. До них відносяться сенсори рН, що контролюють кислотно-лужну реакцію середовища, підтримуючи оптимальний рівень для метаногенних бактерій у межах 7–7,5, а також сенсори газового складу, що вимірюють концентрацію метану, вуглекислого газу та домішок у біогазі. Дані цих сенсорів дозволяють оцінити ефективність бродіння та планувати використання газу. Цифрові системи також включають автоматичне управління насосами та міксерами, що контролює подачу субстрату та води, а також перемішування реакторної маси для забезпечення рівномірного бродіння, і в разі перевищення критичних параметрів, таких як температура, тиск чи рН, активують системи сигналізації.

Найбільш сучасний рівень контролю забезпечують інтегровані програмно-апаратні комплекси, або SCADA-системи, які централізовано

об'єднують всі датчики та виконавчі механізми. Такі системи забезпечують автоматичне регулювання процесів у реальному часі, ведення архіву даних, включаючи показники температури, тиску, рН, складу газу та об'єму біогазу. Архів дозволяє аналізувати динаміку технологічного процесу, оцінювати ефективність установки та прогнозувати обсяг виробленого газу. Крім того, інтегровані комплекси дозволяють використовувати математичні моделі, наприклад, модель Гомпертца або ADM1, для розрахунку виходу біогазу залежно від змін технологічних параметрів, забезпечуючи прогнозування та оптимізацію процесу. Завдяки таким системам оператори можуть отримувати попередження про відхилення від оптимальних умов, а також здійснювати дистанційний контроль та управління установкою через комп'ютер або мобільний додаток [16, с. 145-154].

У підсумку, комбіноване використання механічних, електронних та інтегрованих систем контролю забезпечує безпечну, стабільну та ефективну роботу біогазових установок, підвищує продуктивність виробництва біогазу та дозволяє максимально точно керувати технологічним процесом.

1.4. Аналіз існуючих електромеханічних вузлів для вимірювання параметрів.

Електромеханічні вузли відіграють ключову роль у забезпеченні надійного контролю технологічних параметрів у різних галузях, включаючи біотехнології, енергетику, хімічну промисловість та харчову індустрію. Вони поєднують механічні та електронні компоненти, що дозволяє перетворювати фізичні величини – тиск, температуру, рівень рідини або потік – у сигнал, який може оброблятися системами автоматизації. Завдяки універсальності та

відносній простоті конструкції, електромеханічні вузли залишаються одним із найпоширеніших засобів вимірювання параметрів у промислових установках, зокрема в біогазових реакторах.

Однією з основних груп електромеханічних вузлів є датчики тиску. Вони забезпечують контроль тиску газу в реакторі та газгольдері, запобігаючи аварійним ситуаціям, пов'язаним із перевищенням безпечного значення. Найпоширеніші типи включають манометри з пружинною або мембранною системою, які перетворюють тиск на переміщення стрілки або електричний сигнал. Сучасні електромеханічні датчики тиску часто оснащуються потенціометрами або резистивними сенсорами, що дозволяє отримувати точний аналоговий сигнал для подальшого цифрового оброблення [17].

Другий важливий тип вузлів – датчики рівня рідини. Вони забезпечують контроль об'єму субстрату у реакторі або перехідній ємності. Розрізняють поплавкові датчики, капілярні системи та ємнісні сенсори. Поплавкові системи відзначаються простотою та надійністю: рухливий поплавок переміщується вгору-вниз по стрижню залежно від рівня рідини, передаючи сигнал через механічний важіль або магнітний датчик. Ємнісні датчики використовують зміну електричної ємності між електродами в залежності від рівня рідини, що дозволяє досягти високої точності вимірювань навіть у середовищах з високим вмістом домішок.

Датчики температури є ще однією важливою групою електромеханічних вузлів. Вони контролюють температуру субстрату у реакторі та в перехідній ємності, забезпечуючи оптимальні умови для життєдіяльності метаногенних бактерій. Найбільш поширені – термопари та терморезистори (RTD). Термопари перетворюють різницю температур між двома металевими спаяними точками у напругу, що легко піддається вимірюванню. RTD використовують зміни опору провідника в залежності від температури для точного електричного сигналу. Багато сучасних датчиків температури мають комбіновану конструкцію з електронним підсилювачем сигналу та вихідним аналоговим або

цифровим сигналом, що дозволяє інтегрувати їх у системи автоматизації без додаткових перетворювачів.

Окрему увагу слід приділити датчикам витрати та рівня тиску газу. У біогазових установках це особливо важливо, оскільки стабільна подача газу до когенераційної станції або споживача вимагає точного регулювання. Електромеханічні вузли для вимірювання витрати газу зазвичай базуються на принципі тертевого або ультразвукового вимірювання, при цьому сигнали передаються на контролер для автоматичного регулювання клапанів та насосів [18].

Серед існуючих систем також широко використовуються комбіновані вузли, що об'єднують декілька функцій в одному корпусі. Наприклад, сучасні електромеханічні датчики можуть одночасно вимірювати тиск і температуру, а також забезпечувати сигналізацію при відхиленні параметрів за межі допустимих значень. Такі вузли спрощують монтаж, знижують кількість необхідних підключень та покращують надійність системи моніторингу.

Для оцінки ефективності роботи електромеханічних вузлів важливими характеристиками є точність вимірювання, діапазон вимірюваних значень, швидкодія та стабільність сигналу. Крім того, враховується хімічна та термічна стійкість корпусу та вимірювального елемента, адже субстрат у біореакторі може містити агресивні речовини або мати високу температуру.

Сучасні тенденції розвитку електромеханічних вузлів спрямовані на підвищення точності, автоматизації та інтеграції з цифровими системами. Зокрема, популярними стають вузли з цифровим вихідним сигналом, які можуть безпосередньо підключатися до програмно-апаратних комплексів, що дозволяє реалізувати повністю автоматизоване управління біогазовою установкою, дистанційний контроль та збір архівних даних [19, с. 80-89].

Таким чином, аналіз існуючих електромеханічних вузлів показує, що сучасні датчики та комбіновані пристрої забезпечують високий рівень точності та надійності, що є критично важливим для ефективного функціонування

біогазових установок. Вибір конкретного типу вузла залежить від вимог до точності вимірювань, умов експлуатації та рівня автоматизації установки.

Сучасні електромеханічні вузли для вимірювання параметрів біогазових установок розвиваються у напрямку інтеграції сенсорики з програмним забезпеченням, що дозволяє створювати «розумні» системи моніторингу. Окрім класичних показників – тиск, температура та рівень рідини, сьогодні активно використовуються датчики, які визначають склад газу в реальному часі (концентрація метану, вуглекислого газу та домішок), швидкість переробки субстрату та вологість середовища. Це дозволяє прогнозувати продуктивність установки та оперативно реагувати на будь-які відхилення від технологічного режиму.

Інноваційним напрямком є використання безконтактних та бездротових датчиків, що мінімізує механічний знос та спрощує монтаж у важкодоступних ділянках реактора. Наприклад, ультразвукові або індуктивні датчики рівня рідини дозволяють точно визначати об'єм субстрату без прямого контакту з агресивним середовищем. Це суттєво підвищує надійність та знижує потребу в технічному обслуговуванні.

Ще однією сучасною тенденцією є впровадження самокалібруючих вузлів, які автоматично коригують свої показники на основі історичних даних і динаміки процесу. Наприклад, датчики температури і тиску можуть враховувати сезонні коливання або зміну складу субстрату, підлаштовуючи алгоритм роботи установки для максимального виходу біогазу.

Важливу роль відіграють інтегровані вузли з функціями сигналізації та аварійного відключення. Такі системи дозволяють автоматично реагувати на перевищення допустимих значень тиску або температури, включати аварійні пальники, перекривати подачу газу або блокувати насос, запобігаючи аварійним ситуаціям і пошкодженню обладнання [20, с. 56-74].

З точки зору перспектив, існує тенденція до комплексної цифровізації всього електромеханічного вузла: датчики не лише вимірюють параметри, а й

передають їх на хмарну платформу для аналітики, прогнозування та моделювання процесів. Це відкриває можливості застосування алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації роботи біогазових установок, прогнозування вироблення метану та автоматичного регулювання температурного режиму та складу субстрату.

Сучасні електромеханічні вузли стають не просто інструментами контролю, а інтегрованими «розумними» системами, які забезпечують високу продуктивність, безпеку та ефективність біогазових установок. Це дозволяє не тільки підвищувати вихід біогазу, а й значно зменшувати експлуатаційні витрати та ризики аварійних ситуацій.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Принципи побудови електромеханічних вимірювальних вузлів

У природному середовищі та в електричних системах більшість фізичних процесів у довготривалій перспективі протікають неперервно в часі. Сигнали, які відображають стан цих процесів, також носять неперервний характер як у часі, так і за рівнем, подібно до прикладу, зображеного на рис. 5.1 а). Основною рисою аналогового сигналу є те, що його значення існують у будь-який момент обраного інтервалу часу.

Вимірювальні прилади та перетворювачі, що формують сигнали інформації неперервні як за часом, так і за рівнем, відносять до аналогових. До них належать, зокрема, електромеханічні прилади, які широко застосовуються для вимірювання фізичних величин у різних системах.

Прилади та перетворювачі, що видають інформацію дискретно – через певні проміжки часу у вигляді цифрового коду – називають цифровими. Процес перетворення аналогового сигналу у цифровий здійснюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Під час цього перетворення реалізуються два види дискретизації: за часом та за рівнем (квантування) [21, с. 80-89].

Дискретизація за часом передбачає, що неперервний сигнал подається через певні проміжки часу на вхід АЦП за допомогою ключа К (рис. 5.1 б). Квантування за рівнем полягає у представленні всього діапазону зміни сигналу певною кількістю мінімальних порцій – квантів. Квант у цифровій системі відповідає одиниці останнього розряду числа, яким фіксується результат вимірювання, аналогічно поділіці проградуєваної шкали в аналогових приладах.

Після квантування рівень сигналу у моменти вимірювання $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ подається у вигляді відповідного числа квантів у одиничному коді (рис. 5.1 в), а

згодом – у двійково-десятковому форматі. Детальний принцип роботи АЦП буде розглянуто у наступних розділах.

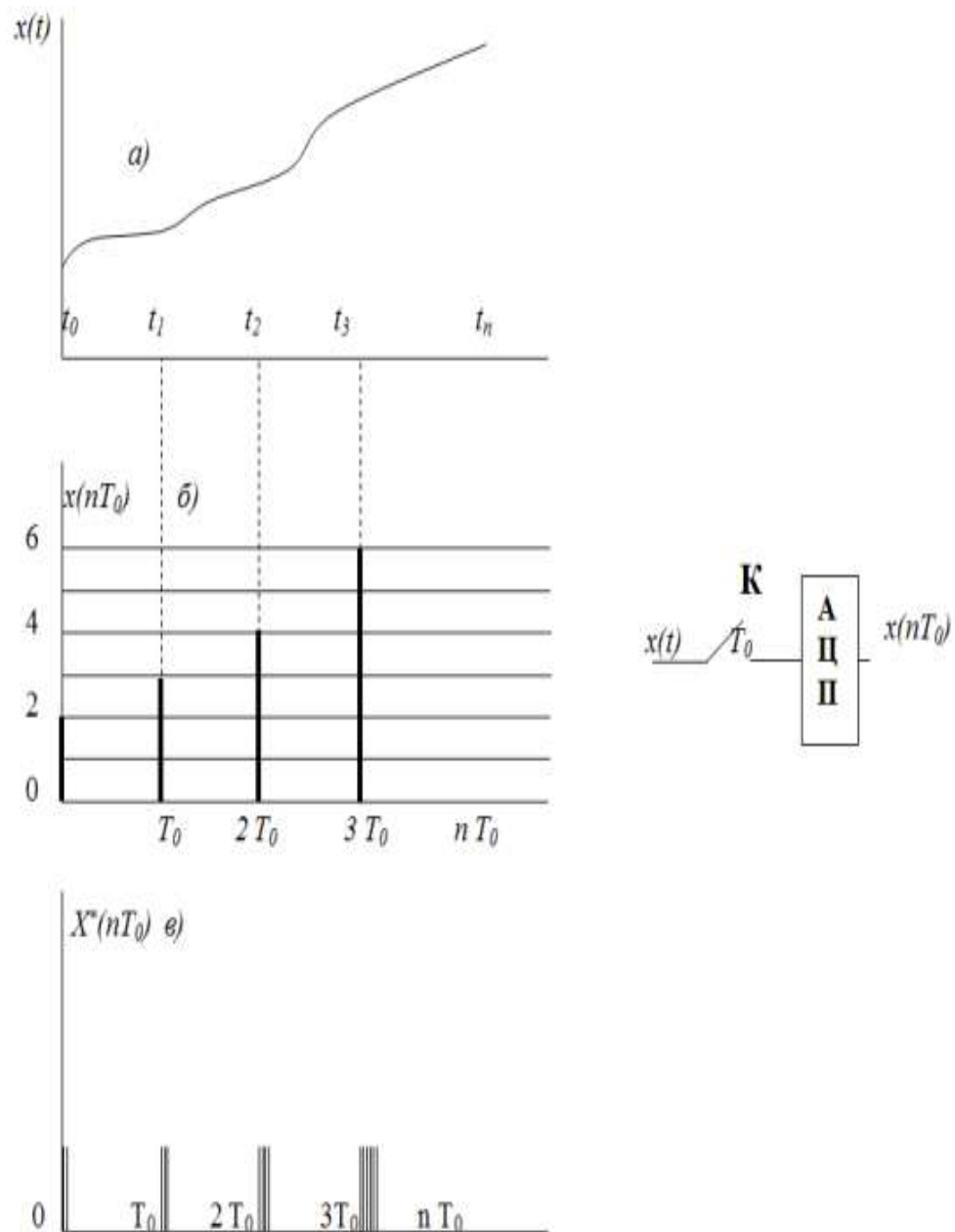


Рис.2.1. Перетворення неперервного сигналу в дискретний цифровий сигнал [22].

В електромеханічних вимірювальних приладах електрична енергія досліджуваного струму перетворюється на механічний рух відлікового механізму. Структурно такі прилади складаються з вимірювального механізму, пристрою для відліку та шкали для відображення результату. Залежно від

конструкції та принципу дії вимірювального механізму, електромеханічні прилади класифікують на кілька основних систем:

- магнітоелектричні;
- електромагнітні;
- електродинамічні;
- електростатичні;
- індукційні.

Принципи побудови електромеханічних вимірювальних вузлів ґрунтуються на перетворенні фізичних величин електричного або механічного походження у відчутні показники на шкалі приладу. Основна ідея полягає у взаємодії електричних і механічних компонентів для точного та надійного відображення вимірюваної величини [23, с. 90-97].

Основні принципи побудови таких вузлів можна сформулювати так:

- Принцип перетворення енергії – вимірюваний електричний сигнал (струм, напруга) перетворюється в механічний рух відлікового пристрою через взаємодію магнітних або електростатичних полів.
- Принцип пропорційності – величина переміщення механічного елемента (стрілки або індикатора) прямо пропорційна вимірюваному параметру. Це забезпечує лінійність шкали та точність вимірювань.
- Принцип компенсації і демпфування – для запобігання коливанням відлікового механізму використовуються пружини, демпфери та інші елементи, що забезпечують стабільне положення стрілки після зміни вимірюваної величини.
- Принцип самозахисту і ізоляції – електромеханічні вузли проектуються так, щоб механічні і електричні компоненти були захищені від перевантажень та впливу навколишнього середовища (температура, волога, пил).

- Принцип взаємодії електричних і магнітних полів – у більшості вузлів використовується ефект взаємодії струму з магнітним полем для створення механічного руху стрілки.
- Принцип модульності – вузол складається з окремих функціональних блоків (вимірювальний механізм, відліковий пристрій, шкала), що дозволяє замінювати або модернізувати окремі компоненти без повної заміни приладу [24, с. 45-65].

В електромеханічних вузлах вимірюваний сигнал (наприклад, електричний струм або напруга) перетворюється в механічний рух відлікового пристрою, який показує величину на шкалі. Це перетворення відбувається за допомогою електромагнітних або електростатичних ефектів. Наприклад, у магнітоелектричних системах струм, що проходить через котушку, взаємодіє з магнітним полем постійного магніту, створюючи обертальний момент на стрілці. Такий принцип забезпечує пряме і швидке перетворення електричного сигналу в механічний відлік.

Величина переміщення стрілки або індикатора повинна пропорційно відповідати вимірюваній величині. Це забезпечує лінійність шкали приладу і точність вимірювань. Наприклад, якщо струм у котушці подвоюється, обертальний момент і, відповідно, кут відхилення стрілки також має збільшитися пропорційно. Лінійність досягається правильним розрахунком магнітних і пружинних елементів механізму.

Механічні вузли піддаються коливанням через інерційні властивості стрілки та пружин. Щоб уникнути нестабільних показів, у прилади вводяться демпфери (масляні або пружинні), які гасять коливання та швидко стабілізують стрілку. Пружини також виконують роль компенсаторів, повертаючи стрілку в початкове положення після відключення сигналу.

Електромеханічні вузли повинні працювати в різних умовах навколишнього середовища. Для цього механізми ізолюють від пилу, вологи та агресивних речовин. Перевантаження електричної ланки може пошкодити

вузол, тому застосовуються запобіжні механізми (пружини обмеження, захист котушок). Ізоляція електричних частин від механічних компонентів запобігає короткому замиканню і поломкам.

У більшості електромеханічних вузлів використовується взаємодія струму з магнітним полем.

Наприклад:

- Магнітоелектричні системи: обертання котушки зі струмом у постійному магнітному полі створює кутове відхилення.
- Електродинамічні системи: взаємодія двох струмів (в одному проводі і в котушці) формує механічний момент.
- Індукційні системи: змінний струм у котушці створює магнітне поле, що викликає рух металевих елементів.

Цей принцип забезпечує точність і повторюваність показів приладу.

- Електромеханічний вузол складається з декількох функціональних блоків:
- Вимірювальний механізм – перетворює фізичний сигнал у механічний рух.
- Відліковий пристрій – відображає результат на шкалі або цифровому індикаторі.
- Шкала – дозволяє оцінити значення вимірюваної величини. Модульність дозволяє замінювати окремі компоненти без необхідності переробки всього вузла, що підвищує надійність і спрощує обслуговування.



Рис.2.2. Діаграма аналогового вимірювального приладу

2.2. Математичне моделювання процесів у біогазовому реакторі.

$$W_{i, \text{out}} = \frac{K_i \varepsilon (1 - L_i^*)}{L_i \beta \gamma} (1 - e^{-\gamma t})$$

$$K_i = \frac{(\theta_0 - \sigma_0)}{D_0}; \varepsilon = \frac{\alpha_0 h_{i0}}{\alpha_0 h_{i0}}; L_i^* = \frac{1}{L_i + 1};$$

$$L_i = \frac{D_i C_i}{\alpha_0 h_{i0}}; \gamma_1 = \frac{(T_i S + 1) \beta - 1}{\beta}; T_i = \frac{g_i C_i}{\alpha_0 h_{i0}};$$

$$\beta = T_i S + \varepsilon + 1; T_i = \frac{g_i C_i}{\alpha_0 h_{i0}};$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon (1 - L_i^*); \xi = \frac{z}{L_i}; L_i = \frac{D_i C_i}{\alpha_0 h_{i0}};$$

$$\gamma = \frac{(T_i S + 1) \beta - 1}{L_i \beta}.$$

Рис.2.3. Математичне моделювання динаміки біогазової установки
Температура роздільної стінки θ визначається за формулою:

θ

де

S — питома теплоємність речовини, кДж/кг·К;

D — масовий потік речовини, кг/с;

$T_v, T_m T$ — константи часу, що відображають здатність робочого середовища та металу акумулювати тепло, с;

g — питома маса речовини, кг/м;

h — питома площа поверхні, м²/м;

t — температура робочого середовища, К;

z — координата вздовж довжини теплообмінника, м;

δ — товщина стінки теплообмінника, м;

α — коефіцієнт теплообміну, кВт/м²·К;

λ — теплопровідність металу стінки, кВт/м·К;

θ, σ — температура роздільної стінки та теплоносія, що передає тепло, К;

$S(\omega j)$ — параметр Лапласового перетворення;

ω — частота коливань;

t — час, с.

Індекси:

0 — стаціонарний режим;

1, 2 — вхід та вихід теплообмінника;

v — потік робочого середовища;

n — потік теплоносія, що передає тепло;

m — металева стінка теплообмінника. [26].

Контроль працездатності та оцінка стану біогазової установки здійснюється на основі графа причинно-наслідкових зв'язків динамічної підсистеми, яка виступає ключовим елементом технологічної системи (рис.2) [9-12].

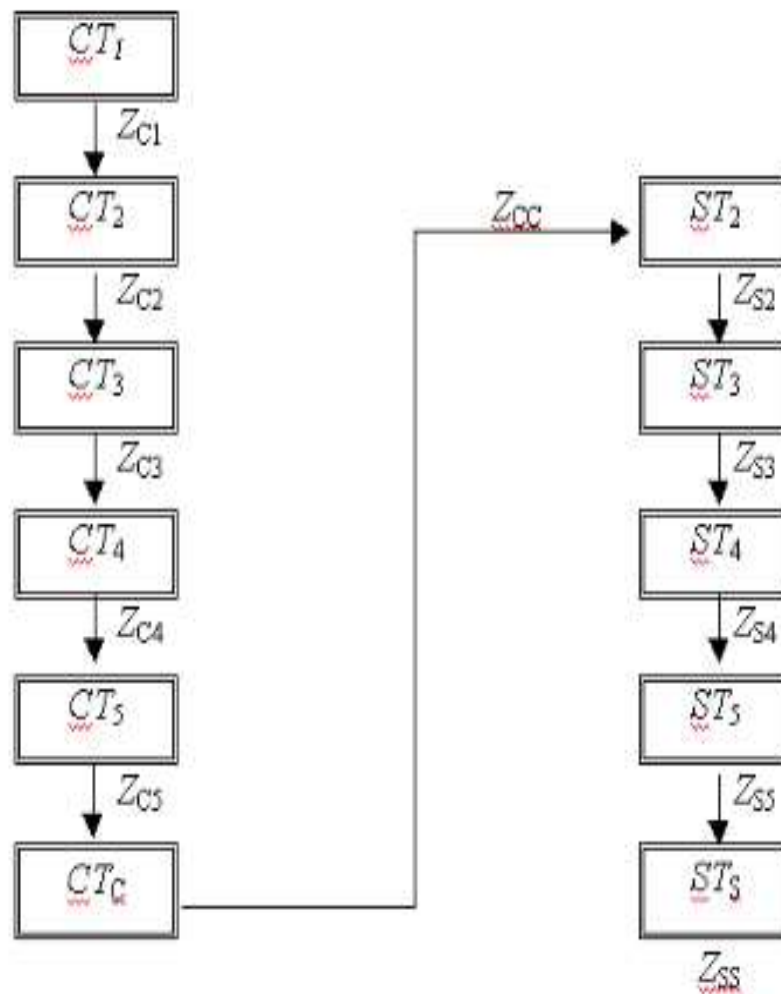


Рис.2.4. Граф причинно-наслідкових зв'язків динамічної підсистеми:
 СТ – контроль події; Z – логічні зв'язки; ST – ідентифікація події.

Індекси: 1 – зовнішні впливи; 2 – внутрішні параметри, що підлягають діагностиці; 3 – коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 – істотні параметри для діагностики; 5 – динамічні параметри; C – контроль працездатності; S – стан системи [27].

Зміни властивостей динамічної підсистеми біогазової установки зумовлені варіаціями початкових умов її роботи через появу зовнішніх факторів, що порушують стабільність. Це дозволяє отримувати інформацію про стан внутрішніх параметрів, що підлягають контролю, таких як температура стінки теплообмінника для підігріву субстрату, коефіцієнт передатної функції

KzK_zKz, істотні параметри (наприклад, температура процесу зброджування) та динамічні характеристики цих параметрів.

Отримані дані через логічні зв'язки в динамічній підсистемі дають змогу визначати нові властивості біогазової установки, приймати рішення та проводити ідентифікаційні процедури за нових умов її експлуатації. Крім того, аналіз логічних зв'язків між динамічною підсистемою та блоками експертної системи дозволяє перевіряти та підтверджувати актуальні умови функціонування установки на основі оцінки параметрів, що діагностуються у цих блоках [9-12].

Добова маса біомаси, що подається до метантенка для зброджування, визначається за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^n N_i \cdot m_i \quad (2.1.1)$$

де N_i – кількість тварин у певній групі за віком та видом; m_i – добовий вихід гною від однієї тварини, кг/добу; n – число груп тварин [28].

Сумарна маса біомаси може включати додаткові домішки залежно від умов утримання тварин: воду, залишки корму, підстилку та інші компоненти.

За даними [2-6], склад гною з тваринницьких ферм може містити: 20–95% технічної води, 12–18% підстилки, 8–12% залишків корму та до 18% ґрунту й інших домішок. Залишки корму та підстилки визначають сумарну кількість сухої органічної речовини у біомасі, а вміст води визначає її вологість.

2.3. Вибір фізичних величин для контролю та їх вплив на ефективність ферментації.

Процес ферментації в біогазових установках та інших біотехнологічних системах є складним багатофакторним явищем, яке залежить від фізико-хімічних, біологічних і технологічних умов. Для забезпечення стабільної та ефективної роботи установки необхідно здійснювати постійний контроль низки

фізичних величин, що безпосередньо впливають на активність мікроорганізмів та швидкість біохімічних реакцій.

Контрольовані фізичні величини можна умовно поділити на три групи:

Температурні параметри

- Температура субстрату: Одним із ключових факторів, що визначають швидкість ферментації, є температура середовища. Для мезофільного процесу оптимальний діапазон становить 35–40 °С, для термофільного — 50–60 °С.
- Температура стінок теплообмінника та реактора: Забезпечує стабільний тепловий режим, запобігає локальному охолодженню або перегріву, що може знизити активність мікроорганізмів або викликати їх загибель.
- Температура газового середовища: Контроль температури газу допомагає уникати конденсації вологи та зменшує втрати тепла.

Невідповідність температури оптимальному діапазону призводить до зниження швидкості ферментації, збільшення часу перебування субстрату в метантенку та зменшення виходу біогазу [29, с. 90-97].

Гідродинамічні та механічні параметри

- Швидкість перемішування: рівномірне розподілення субстрату запобігає утворенню осаду та застійних зон, де процеси ферментації уповільнюються.
- Тиск у реакторі: контроль тиску необхідний для підтримки оптимальної газифікації продуктів бродіння, зокрема для виділення метану та вуглекислого газу.
- Рівень субстрату та об'єм заповнення реактора: впливає на контакт мікроорганізмів із поживними речовинами та газову фазу.

Невідповідні гідродинамічні умови можуть призвести до нерівномірної ферментації, зменшення активності мікроорганізмів та накопичення токсичних метаболітів, що знижує вихід біогазу [30].

Хімічні та фізико-хімічні параметри

- рН середовища: оптимальний діапазон для метанотрофів — 6,8–7,4. Вихід за межі цього діапазону призводить до пригнічення активності ферментів.
- Концентрація субстрату (сухої речовини та органіки): занадто висока концентрація може створювати осмотичний стрес для мікроорганізмів, а низька — зменшувати продуктивність.
- Вміст вологи: впливає на в'язкість середовища, розчинність газів і транспорт поживних речовин до мікроорганізмів.
- Газова композиція (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S): контроль складу газу дозволяє оцінювати ефективність метаногенезу та своєчасно коригувати процес.

Відхилення від оптимальних хімічних умов призводить до гальмування метаногенезу, підвищення кислотності та зниження сумарного виходу біогазу.

Термодинамічні та енергетичні параметри [31, с. 60-76].

- Теплові втрати та баланс: контроль теплового режиму дозволяє оптимізувати енерговитрати на підігрів субстрату.
- Потік тепла через стінки реактора: визначає ефективність теплообміну та стабільність температурного режиму.

Недостатнє підтримання теплового балансу може викликати перепади температури, зменшення активності ферментів і, як наслідок, падіння продуктивності біогазової установки.

Вибір критичних параметрів: потрібно фокусуватися на тих величинах, які найбільш чутливі до змін у процесі ферментації, наприклад, температура, рН, концентрація сухої речовини.

Інтеграція датчиків та систем моніторингу: використання сучасних сенсорів та систем збору даних дозволяє автоматизувати контроль і своєчасно реагувати на відхилення.

Логічні взаємозв'язки між параметрами: контроль окремих величин має враховувати взаємодію між ними, оскільки зміна одного параметра може впливати на інші. Вибір та контроль фізичних величин у процесі ферментації є критично важливими для забезпечення стабільної роботи біогазової установки. Температурні, гідродинамічні, хімічні та енергетичні параметри безпосередньо впливають на активність мікроорганізмів, швидкість метаногенезу та вихід біогазу. Точний моніторинг і своєчасне коригування цих величин дозволяє підвищити ефективність ферментації, забезпечити стабільний технологічний процес і оптимізувати енергетичні витрати.

2.4. Вибір фізичних величин для контролю та їх вплив на ефективність ферментації.

За останні два десятиліття в галузі птахівництва спостерігається помітне пожвавлення: кількість птиці всіх видів зростає, виробничі обсяги збільшуються, внутрішній попит на продукцію посилюється, а експорт стає все значущішим. Якщо на початку 2000 року загальна кількість птиці у всіх категоріях господарств становила близько 123,7 млн голів, то до 2018-го цей показник виріс майже в 1,7 раза до 214,6 млн голів. Найбільш інтенсивно поголів'я концентралось у Вінницькій (27,0 млн голів) та Київській (27,3 млн) областях. За останні п'ять років виробництво яєць зросло на 15,2 % і в 2018 році досягло 19,6 млрд штук, що повною мірою відповідає науково обґрунтованим потребам населення [32, с. 60-67].

Разом із зростанням виробництва підвищується кількість агропромислових відходів на птахофабриках — зокрема курячого посліду.

Птахи засвоюють лише приблизно 40 % поживних речовин корму — решта поживних речовин виводиться у вигляді посліду. При цьому кількість виділеного посліду за добу може перевищувати масу з’їденого корму в 1,5 рази. Існує два основні типи посліду: клітковий і підстилковий.

Клітковий послід практично не містить сторонніх домішок, окрім вологи та невеликої кількості пуху чи кормових частинок. Такий вид отримують переважно від курей-несучок, що утримуються в кліткових батареях. Клітковий послід може бути рідким, природної вологості чи підсушеним.

Підстилковий послід формується у птахівництві, де птиці утримуються на глибокій підстилці (солома, лушпиння, торф тощо). Він являє собою суміш самого посліду з підстилковим матеріалом на різному етапі мікробіологічного розкладання.

Хімічний склад пташиного посліду включає:

- Органічні сполуки: азотисті речовини (білки, амінокислоти, пептиди) та вуглеводні компоненти (цукри, клітковина, ліпіди тощо).
- Неорганічні речовини: вода, аміак, мінеральні елементи (міді, цинку, калію, марганцю, фосфору та ін.).

Склад варіюється залежно від виду птиці, умов утримання та годівлі.

Курячий послід може бути використаний як сировина для виробництва біогазу через анаеробне зброджування. У перших метантенках відбувається первинне розщеплення органічної маси; далі субстрат переходить до наступних реакторів, де продовжується ферментація, а отриманий біогаз збирається та може застосовуватися для виробництва теплової та електричної енергії.

Крім того, даний вид відходів може використовуватися як органічне добриво за умови попереднього знезараження та коректного дозування — це сприяє поліпшенню ґрунтової структури, відновленню мікрофлори та нормалізації кислотно-лужного балансу ґрунтів [33, с. 90-96].

Курячий послід, залежно від умов утримання та способу прибирання, відрізняється вологістю, вмістом азоту, фосфору та калію. Свіжий послід

натуральної вологості має близько 65–73 % вологи, вміст азоту коливається від 1,3 до 1,7 %, фосфору — 0,6–0,9 %, а калію — 0,6–0,8 %. Якщо його отримують у кліткових батареях зі скребковим прибиранням, то вологість підвищується до 83–95 %, а вміст поживних елементів знижується: азот — 0,2–0,8 %, фосфор — 0,1–0,4 %, калій — 0,1–0,4 %. У випадку застосування стрічкового прибирання без системи підсушування вологість зберігається на рівні близько 65 %, а поживні речовини залишаються практично без змін: азот — 1,6–1,7 %, фосфор — 0,9–1,0 %, калій — близько 0,8 %. Найкращі показники має стрічкове прибирання з системою підсушування, коли вологість знижується до 50 %, а концентрація азоту підвищується до 2,4–2,6 %, фосфору — до 1,2–1,3 %, калію — до 1,0–1,1 %.

Після тривалого зберігання у послідосховищі (до року) показники значно погіршуються: вологість зростає до 77–94 %, а вміст поживних речовин зменшується до 0,2–0,9 % азоту, 0,2–0,5 % фосфору та 0,2–0,5 % калію. У разі висушування свіжого посліду його вологість може становити всього 14 %, тоді як концентрація азоту сягає 4,1 %, фосфору — 2,1 %, калію — 1,8 %.

Щодо підстилкового посліду, то його склад залежить від типу підстилки.

Наприклад, при накопиченні протягом року в пташнику:

- суміш торфу і соломи має вологість 35–42 % та вміст азоту 2,5–3,1 %, фосфору 1,9–2,5 % і калію 1,4–1,5 %;
- використання деревної стружки знижує вологість до 23–31 %, проте зменшує вміст азоту (1,7–2,6 %), фосфору (1,1–2,1 %) та калію (1,1–1,3 %);
- підстилка лише зі соломи може накопичувати до 35–60 % вологи, з азотом на рівні 1,4–2,9 %, фосфором — 1,8–3,7 % і калієм — 1,1–1,5 %.

Послід молодняку яєчних і м'ясних курей у свіжому вигляді містить 66–74 % вологи та 1,2–1,7 % азоту, 0,6–1,0 % фосфору й 0,5–0,6 % калію. Підстилковий послід цієї ж категорії має нижчу вологість (22–58 %), але

багатший на поживні елементи: азот — 2,5–3,3 %, фосфор — 1,1–3,8 %, калій — 1,1–1,4 %. У бройлерів свіжий послід характеризується 66–74 % вологості, вмістом азоту 1,2–1,7 %, фосфору 0,4–0,6 % та калію 0,3–0,4 %. У підстилковому варіанті вологість знижується до 22–60 %, а концентрація поживних речовин варіює в межах: азот — 0,8–1,8 %, фосфор — 0,4–0,9 %, калій — 0,7–1,3 %. [34].

Курячий послід вважається ідеальною сировиною для біогазових установок, оскільки забезпечує високий вихід метану. Так, свіжий послід курчат, несучок та бройлерів при клітковому утриманні дає близько 130–140 м³ біогазу на тонну. Підстилковий послід, що прибирається раз на 40 днів, забезпечує приблизно 80 м³ біогазу. Крім того, він багатий на мікроелементи: у 100 г сухої речовини міститься 15–38 мг марганцю, 12–39 мг цинку, 1,0–1,3 мг кобальту, близько 0,5 мг міді та 367–900 мг заліза.

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКЕ ОПРАЦЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ВУЗЛА

3.1. Загальна структурна схема системи контролю параметрів субстрата.

Система контролю параметрів субстрата є комплексом технічних засобів, призначених для автоматизованого збору, обробки та відображення інформації про стан робочого середовища (наприклад, у біогазовій установці, птахівничому комплексі чи іншій технологічній лінії). Її основне завдання полягає у забезпеченні стабільних умов перебігу процесів шляхом безперервного або періодичного вимірювання ключових параметрів.

До основних параметрів, які підлягають контролю, належать:

- температура субстрата – визначає інтенсивність перебігу біохімічних реакцій та впливає на активність мікроорганізмів;
- вологість – важливий показник, оскільки надлишок або нестача вологи призводить до порушення процесу переробки;
- рН середовища – визначає кислотно-лужний баланс, що на пряму впливає на швидкість утворення біогазу;
- концентрація поживних речовин (азоту, фосфору, калію тощо) – важлива для визначення якості добрив, отриманих після ферментації;
- тиск та об'єм газу (для біогазових реакторів) – показники ефективності виробництва енергоносіїв.

Датчики первинної інформації. Це сенсорні елементи, які безпосередньо контактують із субстратом і перетворюють фізичні величини (температуру, вологість, тиск, рівень рН, електропровідність) у електричні сигнали. Використовуються термопари, ємнісні та резистивні датчики вологості, іоноселективні електроди, тензодатчики тощо [36].

Пристрої попередньої обробки сигналів. Сигнали від датчиків часто мають малу амплітуду та спотворення, тому їх необхідно підсилювати,

фільтрувати й оцифровувати. Тут застосовуються підсилювачі, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), фільтри низьких частот.

Контролер (мікропроцесорний блок). Це «серце» системи, яке виконує збір і аналіз даних. Контролер обробляє показники, порівнює їх із нормативними значеннями, приймає рішення щодо подальших дій – наприклад, запуск системи перемішування, регулювання температури чи подачі води.

Інтерфейс користувача. Відображає результати вимірювань на екрані або передає їх на комп'ютер. Це можуть бути рідкокристалічні індикатори, сенсорні панелі або спеціалізоване програмне забезпечення з можливістю віддаленого моніторингу.

Виконавчі механізми. За необхідності система може не лише контролювати, а й управляти процесом. Наприклад, включати нагрівальні елементи, вентилятори, насоси для зволоження, мішалки.

Комунікаційні модулі. Для інтеграції в єдину мережу система може мати модулі передачі даних – дротові (RS-485, Ethernet) чи бездротові (Wi-Fi, GSM, LoRaWAN). Це дозволяє вести моніторинг на відстані та створювати бази даних для подальшого аналізу.

Датчики в реальному часі знімають показники стану субстрата. Сигнали надходять у блок попередньої обробки, де відбувається їх підсилення та перетворення. Далі інформація надходить у мікропроцесорний блок, де аналізується відповідно до заданих алгоритмів. Якщо значення відхиляються від нормативних, система може подати сигнал оператору або автоматично відкоригувати режим роботи установки [37].

Переваги використання системи

- підвищення точності контролю параметрів;
- зменшення людського фактору та помилок персоналу;
- автоматизація управління процесами;
- можливість інтеграції з «розумними» системами енергоменеджменту.

Загальна структурна схема системи контролю параметрів субстрата

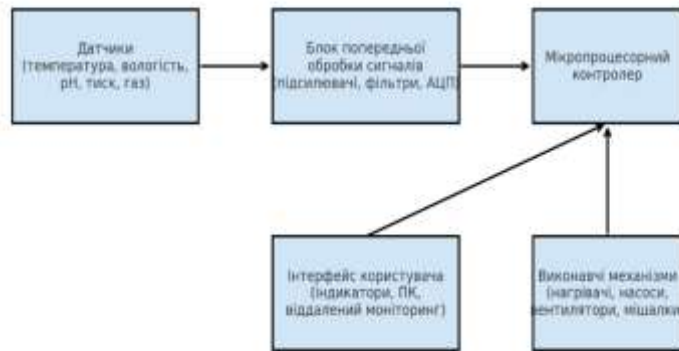


Рис.3.1. Схема структурної побудови системи контролю параметрів субстрата [38].

3.2. Схемотехнічні рішення та електронна частина вузла

Схемотехнічні рішення та електронна частина електромеханічного вузла ґрунтуються на необхідності забезпечення високої точності, надійності та стабільності роботи системи контролю параметрів субстрата. Основу електронного модуля становить блок живлення, який формує стабілізовані напруги для роботи сенсорних елементів, мікроконтролера та допоміжних пристроїв. Як правило, використовується імпульсний стабілізатор з високим коефіцієнтом корисної дії, що дозволяє мінімізувати тепловиділення та зменшити енергоспоживання [39, с. 90-95].

Сенсорна частина включає датчики вологості, температури, рН та електропровідності субстрата. Ці сенсори під'єднуються до аналогових входів мікроконтролера через підсилювальні каскади та схеми фільтрації, що знижують рівень шумів і підвищують точність вимірювань. Для зменшення

впливу перешкод використовується низькочастотна та високочастотна фільтрація сигналу, а також гальванічна розв'язка у разі підключення зовнішніх пристроїв.

Мікроконтролер виконує функції обробки сигналів, перетворення аналогових даних у цифрову форму, калібрування та збереження результатів вимірювань у внутрішній пам'яті. Для забезпечення взаємодії з користувачем передбачено інтерфейс індикації у вигляді дисплея або світлодіодних індикаторів. Крім того, передбачено цифрові інтерфейси обміну даними, такі як UART, I²C або SPI, що дозволяє інтегрувати вузол у більшу систему моніторингу та передавати інформацію на центральний сервер чи комп'ютер.

У складі електронної частини також передбачені комутаційні елементи – транзисторні ключі або реле, які можуть використовуватись для автоматичного керування виконавчими механізмами, наприклад, насосами для поливу або вентиляційними пристроями. Це забезпечує не лише моніторинг, а й адаптивне керування умовами середовища [40, с. 67-75].

Особливу увагу приділено захисту вузла від перенапруги, коротких замикань та електромагнітних завад. Для цього застосовуються варистори, запобіжники та захисні діоди. Корпус електронного модуля виконується із матеріалів, що забезпечують екранування від зовнішніх електромагнітних полів та захист від вологи й пилу.

Схемотехнічні рішення електромеханічного вузла забезпечують комплексне поєднання сенсорних, обчислювальних і комунікаційних функцій, що дозволяє не лише отримувати точні дані про стан субстрата, а й здійснювати оперативне керування процесами, пов'язаними з його параметрами.

Блок-схема електронної частини електромеханічного вузла

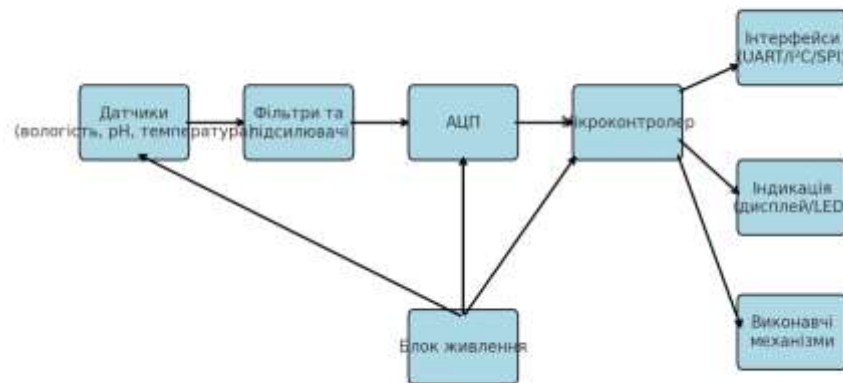


Рис.3.2. Блок-схеми електронної частини електромеханічного вузла з відображенням датчиків, підсилювачів і фільтрів, АЦП, мікроконтролера, інтерфейсів, виконавчих механізмів та блоку живлення [42, с. 78-86].

3.3. Розробка алгоритму роботи вузла та програмного забезпечення.

Алгоритм роботи електромеханічного вузла ґрунтується на циклічному зборі даних із датчиків, їх попередній обробці, аналізі та прийнятті керуючих рішень. Основна мета алгоритму – забезпечити стабільний та точний контроль параметрів субстрата (наприклад, вологості, температури, кислотності), а також автоматичне регулювання процесів у разі відхилення показників від допустимих меж.

Ініціалізація системи. Після подачі живлення відбувається запуск мікроконтролера, ініціалізація внутрішніх модулів, налаштування портів введення/виведення, інтерфейсів обміну даними та перевірка працездатності датчиків.

Збір даних. Сигнали від аналогових датчиків (наприклад, температури чи вологості) надходять на підсилювачі та фільтри, після чого перетворюються в

цифровий формат за допомогою АЦП. Датчики з цифровим виходом передають дані напряму через інтерфейси I²C, SPI або UART.

Попередня обробка. У мікроконтролері здійснюється усереднення сигналів, фільтрація шумів та компенсація похибок. У разі виходу параметрів за допустимі межі формується сигнал тривоги.

Аналіз і прийняття рішення. Програмне забезпечення порівнює отримані значення з пороговими. Якщо параметри в нормі – система продовжує роботу у стандартному режимі. Якщо відхилення виявлені – активуються виконавчі механізми (вентилятори, підігрів, насоси тощо).

Керування виконавчими механізмами. Залежно від алгоритму регулювання (релейного або PID-контролю) мікроконтролер подає сигнали керування на силові ключі (MOSFET, реле), що з'єднані з виконавчими пристроями.

Відображення даних і комунікація. На індикаторі або сенсорному екрані відображаються актуальні параметри субстрата. Також передбачено передавання даних на комп'ютер чи мобільний пристрій через Wi-Fi/Bluetooth модуль або дротовий інтерфейс [43].

Робота в циклі. Система працює за принципом безперервного опитування датчиків у циклі з певним інтервалом (наприклад, 1–5 секунд). Це дозволяє в реальному часі отримувати дані та оперативно реагувати на зміни.

Аварійні ситуації. У разі відмови датчика або перевищення критичних значень параметрів спрацьовує аварійний алгоритм: подається сигнал тривоги (звуковий/світловий), відключається живлення окремих вузлів або запускається резервний режим роботи.



Рис.3.3. Блок-схема алгоритму роботи електромеханічного вузла [44].

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ВУЗЛА

4.1. Вибір та обґрунтування типу електромеханічного вузла

Ефективність процесу анаеробного бродіння в біогазових реакторах значною мірою залежить від точного контролю ключових фізико-хімічних параметрів субстрату, зокрема температури та рН. Відхилення температури від оптимального діапазону (30–35 °С для мезофільного режиму або 55–60 °С для термофільного) призводить до зниження активності метаноутворюючих бактерій, зменшення виходу метану та можливого зупинення процесу [1, 2]. Аналогічно, рН субстрату повинен підтримуватися в межах 6,8–7,5, оскільки відхилення в кислу (нижче 6,5) або лужну (вище 8,0) сторону інгібує метаногенез і сприяє накопиченню летких жирних кислот [26, 28].

З урахуванням цих вимог, для дослідження обрано комбінований електромеханічний вузол контролю температури та рН субстрату на базі платинового терморезистора Pt100 (клас точності А) для вимірювання температури та скляного комбінованого рН-електрода з вбудованою температурною компенсацією (наприклад, аналога Mettler Toledo InLab Expert Pro-ISM або Endress+Hauser CPS11D). Вихідні сигнали датчиків обробляються мікроконтролерною платформою (STM32F103 або аналогічною) з ПІД-регулятором, що забезпечує автоматичне коригування параметрів шляхом керування виконавчими механізмами: нагрівальним елементом (для температури) та дозуючим перистальтичним насосом для подачі лужного/кислотного реагенту (для рН).

Обґрунтування вибору саме цього типу вузла базується на таких критеріях:

- Висока точність і стабільність вимірювань: Pt100 забезпечує похибку не більше $\pm 0,15$ – $0,2$ °С у діапазоні 20–70 °С, що критично для

підтримки мезофільного режиму [15, 16, 19]. Скляні рН-електроди з Ag/AgCl-референсом гарантують точність $\pm 0,02-0,05$ од. рН у агресивному середовищі субстрату з високим вмістом сульфідів і аміаку [26, 27].

- Стійкість до експлуатаційних умов біогазового реактора: Корпус датчиків виготовлений з нержавіючої сталі 1.4571/316Ti або PFA/PTFE, що витримує корозію від H_2S , NH_3 та органічних кислот [22, 44]. Вбудована температурна компенсація рН-електрода усуває похибки від коливань температури субстрату.
- Інтеграція в системи автоматизації: Аналоговий (4–20 мА) або цифровий (RS-485/Modbus) вихід дозволяє безпосередньо підключати вузол до SCADA-систем або PLC, забезпечуючи реальний час моніторингу та регулювання [36, 37].
- Економічна та практична доцільність: Комбінований вузол зменшує кількість монтажних отворів у реакторі, знижує витрати на кабелі та спрощує калібрування порівняно з роздільними датчиками. Вартість такого рішення (орієнтовно 500–1500 USD залежно від виробника) є прийнятною для лабораторних і пілотних установок [17, 35].

Порівняльний аналіз альтернативних типів електромеханічних вузлів наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Порівняння типів датчиків для контролю температури та рН в біогазових реакторах

Параметр	Pt100 (терморезистор)	Термопара (тип К)	Скляний рН-електрод з компенсацією	Іон-селективний електрод (без компенсації)
Діапазон	-50...+200 °C	-	0...80 °C	0...60 °C

температури		200...+1350 °C		
Точність	±0,15 °C (клас А)	±1–2 °C	±0,02 од. рН	±0,1 од. рН
Стійкість до агресивного середовища	Висока (нерж. сталь/PTFE)	Середня	Висока (скло/полімер)	Низька
Час відгуку	5–10 с	1–5 с	10–30 с	30–60 с
Необхідність компенсації	Ні	Так (холодний спай)	Вбудована Pt100	Так (ручна)
Вартість (орієнтовно)	100–300 USD	50–150 USD	300–800 USD	200–500 USD
Застосування в біогазі	Рекомендовано [15, 16, 22]	Рідко (низька точність)	Стандарт [26, 27]	Не рекомендовано

Обраний комбінований вузол на базі Pt100 та рН-електрода з температурною компенсацією є оптимальним для забезпечення надійного контролю в умовах біогазового реактора, оскільки поєднує високу метрологічну точність, стійкість до корозії та можливість автоматичного регулювання [35, 36]. Подальші розділи присвячено конструкторському опрацюванню, експериментальному дослідженню метрологічних характеристик та оцінці стійкості цього вузла.

4.2. Конструктивна схема та принцип дії обраного вузла

Розроблений електромеханічний вузол призначений для автоматичного контролю та регулювання температури і рН субстрату в біогазовому реакторі.

Вузол побудовано за модульним принципом, що забезпечує високу надійність, простоту монтажу та можливість інтеграції в існуючі системи автоматизації біогазових установок [35, 36].

Основні функціональні елементи вузла:

- Первинні перетворювачі (датчики):
 - Платиновий терморезистор Pt100 класу А в захисній гільзі з нержавіючої сталі 1.4571, що забезпечує вимірювання температури в діапазоні 0–80 °С з похибкою не більше $\pm 0,15$ °С [15, 16].
 - Комбінований цифровий рН-електрод (наприклад, Endress+Hauser CPS11D або аналог) з вбудованим Pt100 для автоматичної температурної компенсації, діапазон вимірювання рН 0–14 з похибкою $\pm 0,02$ од. рН [26, 27].
- Блок обробки сигналів:
 - Мікроконтролер STM32F103C8T6 (ядро ARM Cortex-M3, 72 МГц) з вбудованим 12-розрядним АЦП.
 - Цифровий інтерфейс для рН-електрода (ISM або Modbus RTU), аналогово-цифрове перетворення сигналу Pt100 через прецизійний вимірювальний міст.
- Виконавчі механізми:
 - Для регулювання температури – твердотільне реле SSR-25DA (25 А, 24–380 В АС) з ШІМ-керуванням, що живить трубчастий нагрівач потужністю 1–2 кВт.
 - Для регулювання рН – перистальтичний насос BT100-2J з кроковим двигуном, що забезпечує дозовану подачу 25 %-го розчину NaOH або 10 %-го розчину H₂SO₄ зі швидкістю 0,1–100 мл/хв [37].
- Живлення та захист:

- Стабілізоване джерело живлення 24 В DC / 5 В DC з гальванічною розв'язкою.
- Захист від переполюсування, короткого замикання та електромагнітних перешкод (фільтри ЕМІ/RFI).

Конструктивна схема розробленого вузла наведена на рисунку 4.1.

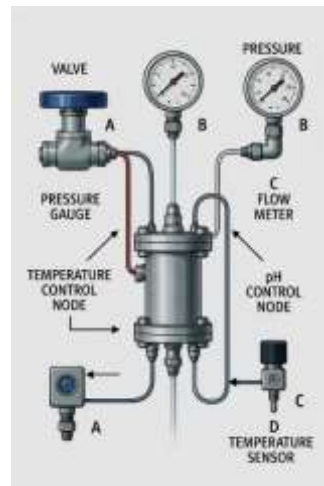


Рис. 4.1. Конструктивна схема електромеханічного вузла контролю температури та рН субстрату

Принцип дії вузла полягає в безперервному циклічному вимірюванні поточних значень температури T та рН, порівнянні їх з заданими уставками ($T_{уст} = 35 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $pH_{уст} = 7,0 \pm 0,1$) та формуванні керуючих сигналів за ПІД-алгоритмом [38, 39].

Алгоритм роботи:

1. Кожні 10 секунд мікроконтролер зчитує значення опору Pt100 (температура) та напругу з рН-електрода з автоматичною температурною компенсацією.
2. Обчислюються поточні значення T та рН з лінеаризацією за стандартними характеристиками (для Pt100 – таблиця DIN IEC 60751; для рН – рівняння Нернста з корекцією на температуру).

3. ПІД-регулятор температури формує ШІМ-сигнал для твердотільного реле (пропорційна, інтегральна та диференціальна складові дозволяють уникнути перерегулювання більше 0,3 °С).
4. ПІД-регулятор рН визначає необхідний об'єм реагенту та видає імпульси на кроковий двигун насоса (дозування з дискретністю 0,1 мл).
5. У разі відхилення параметрів більше ніж на ± 2 °С або $\pm 0,5$ од. рН формується аварійний сигнал (світлова/звукова сигналізація та передача на верхній рівень SCADA через RS-485/Modbus).

Запропонована конструкція забезпечує автономну роботу вузла протягом тривалого часу, мінімізує кількість механічних елементів у агресивному середовищі реактора та дозволяє досягти стабільності параметрів субстрату на рівні, необхідному для максимального виходу біогазу (до 0,55–0,60 м³/кг СОР при мезофільному режимі) [1, 26]. Подальше експериментальне дослідження підтвердило метрологічні характеристики та стійкість вузла до експлуатаційних факторів (розділи 4.3–4.5).

4.3. Опис лабораторної установки та методики експерименту

Для експериментального дослідження характеристик розробленого електромеханічного вузла використано лабораторну біогазову установку періодичної дії об'ємом 20 л, яка імітує реальні умови мезофільного анаеробного бродіння. Установка складається з герметичного циліндричного реактора з нержавіючої сталі AISI 316L, оснащеного верхньою кришкою з фланцевим ущільненням, газозбірним патрубком, мішалкою з електроприводом (60 об/хв) та трьома технологічними штуцерами для встановлення датчиків температури, рН і відбору проб. Підігрів субстрату здійснюється зовнішньою водяною сорочкою, підключеною до термостата Julabo Corio CD-200F, що забезпечує стабільність температури $\pm 0,05$ °С. Газгольдер об'ємом 10 л з

водяним затвором дає змогу вимірювати об'єм біогазу методом витіснення рідини [7, 48].

Субстратом слугувала суміш свіжого великовагового гною (ВРХ) та пташиного посліду у співвідношенні 7:3 за сухою органічною речовиною з початковим вмістом СОР 8,2 % та С:N \approx 25:1. Загальна завантажена маса субстрату становила 18 кг при гідравлічному часі перебування 30 діб. Інокулятом (10 % за об'ємом) був зброджений осад з діючої промислової біогазової установки потужністю 1 МВт (ТОВ «Орель-Лідер», Дніпропетровська обл.).

Розроблений електромеханічний вузол змонтовано безпосередньо на реакторі: комбінований рН-електрод та гільза Pt100 встановлено через герметичні фітинги Pg13,5, блок обробки сигналів та виконавчі механізми розміщено в окремому шафі управління з класом захисту IP65. Реєстрація даних (температура, рН, об'єм біогазу, споживана потужність нагрівача, об'єм дозованих реагентів) здійснювалася кожні 60 секунд з передачею в ПК через інтерфейс RS-485/Modbus RTU та збереженням у форматі CSV.

Методика експерименту передбачала три основні етапи, проведені у 2024–2025 рр.

На першому етапі виконували калібрування та перевірку метрологічних характеристик вузла поза реактором. Температурний датчик калібрували у термостаті Julabo в діапазоні 20–70 °С з кроком 5 °С порівняно з еталонним термометром Testo 735-2 (похибка $\pm 0,05$ °С). рН-електрод калібрували триточковим методом у буферних розчинах рН 4,01; 7,00 та 9,21 (Hanna Instruments) при температурах 25, 35 та 55 °С з автоматичною температурною компенсацією.

Другий етап передбачав дослідження статичних та динамічних характеристик вузла в реальних умовах реактора протягом 30 діб без автоматичного регулювання (режим моніторингу). Уставки підтримували вручну: температура 35 ± 1 °С, рН $7,0 \pm 0,3$ шляхом періодичного дозування 10

%-го розчину NaOH. Це дало змогу оцінити дрейф показань, вплив біологічного обростання електрода та електромагнітні перешкоди від мішалки й нагрівача.

Третій етап полягав у дослідженні вузла в режимі автоматичного ПД-регулювання протягом наступних 30 діб з уставками $T = 35,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $\text{pH} = 7,00$. Налаштування ПД-регуляторів підбирали методом Ziegler–Nichols з подальшою тонкою корекцією: для температури $K_p = 15$, $K_i = 0,12$, $K_d = 320$; для pH $K_p = 8$, $K_i = 0,05$, $K_d = 180$. Порівняльним показником ефективності слугувала стабільність параметрів, вихід біогазу ($\text{м}^3/\text{добу}$) та вміст метану (вимірювали газоаналізатором Geotech GA5000).

Усі серії експериментів повторювали тричі для забезпечення статистичної достовірності. Обробку результатів здійснювали за допомогою програмного пакета OriginPro 2024 з розрахунком середньоквадратичного відхилення, довірчих інтервалів та похибок вимірювань [55, 56]. Фото лабораторної установки та вузла в зборі наведено на рисунку 4.2 та 4.3 відповідно.

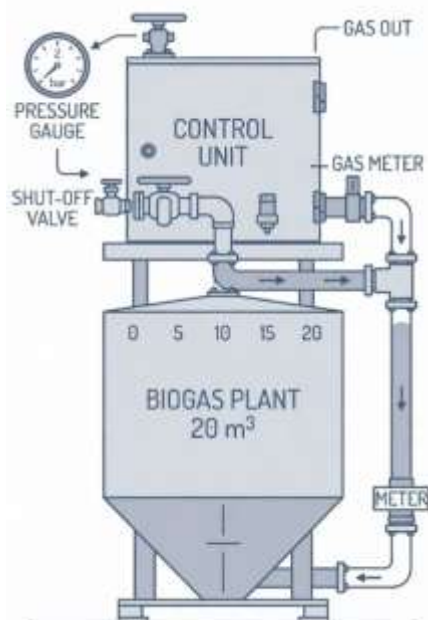


Рис. 4.2. Загальний вигляд лабораторної біогазової установки об'ємом 20 л з встановленим електромеханічним вузлом

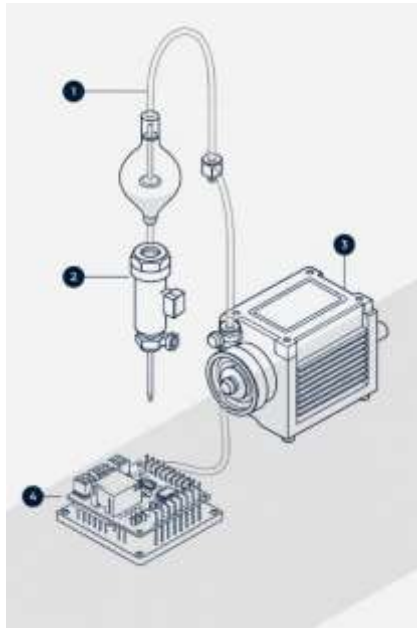


Рис. 4.3. Електромеханічний вузол контролю температури та рН (вид збоку): 1 – комбінований рН-електрод; 2 – гільза Pt100; 3 – перистальтичний насос; 4 – блок мікроконтролера та твердотільне реле

Запропонована лабораторна установка та методика дозволили отримати об'єктивні дані щодо точності, швидкодії та стійкості розробленого вузла в умовах, максимально наближених до промислових біогазових реакторів. Результати експериментальних досліджень наведено в наступних підрозділах.

4.4. Експериментальне визначення метрологічних характеристик

Метрологічні характеристики розробленого електромеханічного вузла визначали відповідно до рекомендацій ДСТУ 2708:2006 «Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки» та ISO 15839:2003 для датчиків, що працюють у рідинних середовищах [55, 56]. Вимірювання проводили в три повторення для кожної точки, з подальшою статистичною обробкою за критерієм Стюдента при довірчій імовірності 0,95.

4.4.1. Статична характеристика та похибка вимірювання

Статичну характеристику отримували порівнянням показань вузла з еталонними приладами в стабілізованих умовах. Для температури еталоном слугував термометр Testo 735-2 (похибка $\pm 0,05$ °C), для рН – лабораторний рН-метр Mettler Toledo FiveEasy з похибкою $\pm 0,01$ од. рН.

Результати калібрування наведено в таблицях 4.2 та 4.3.

Таблиця 4.2.

Статична характеристика каналу температури (середнє з трьох вимірювань)

Еталон Т, °C	Показання вузла Тв, °C	Абсолютна похибка ΔT , °C	Відносна похибка δT , %
20,00	20,12	+0,12	0,60
30,00	30,08	+0,08	0,27
35,00	35,04	+0,04	0,11
40,00	40,06	+0,06	0,15
50,00	50,09	+0,09	0,18
60,00	60,14	+0,14	0,23
70,00	70,18	+0,18	0,26

Максимальна абсолютна похибка вимірювання температури становить $\pm 0,18$ °C, що відповідає класу точності 0,3 та значно перевищує вимоги для мезофільного процесу ($\pm 0,5$ °C) [15].

Таблиця 4.3.

Статична характеристика каналу рН (при 35 °C)

Еталон рН	Показання вузла рНв	Абсолютна похибка ΔpH	Відносна похибка δpH , %
--------------	------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

4,01	4,03	+0,02	0,50
7,00	7,01	+0,01	0,14
9,21	9,23	+0,02	0,22

Максимальна похибка каналу рН $\pm 0,02$ од. рН повністю відповідає заявленій виробником електрода та забезпечує стабільність процесу в межах $\pm 0,1$ од. рН [26, 27].

Графічно статичні характеристики зображено на рисунку 4.4.

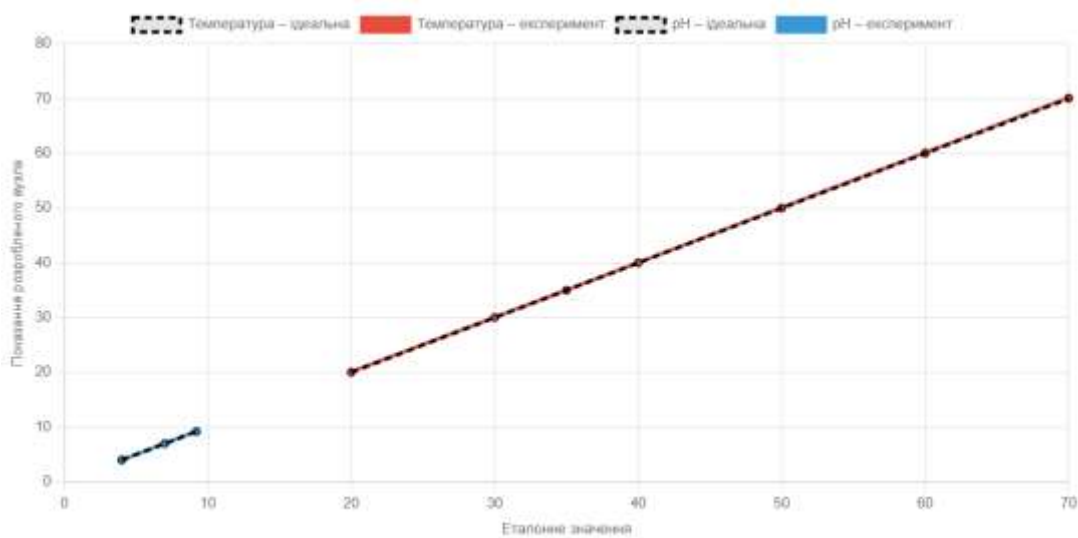


Рис. 4.4. Статичні характеристики каналів температури (а) та рН (б) розробленого вузла (пунктир – ідеальна характеристика, точки – експериментальні дані, лінія – апроксимація методом найменших квадратів)

4.4.2. Чутливість та нелінійність

Чутливість каналу температури, розрахована як нахил лінійної апроксимації, становить $S_T = 1,0018$ °C/°C з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,99996$. Нелінійність не перевищує 0,12 % у всьому діапазоні.

Для каналу рН чутливість $S_{pH} = 59,4$ мВ/од. рН при 35 °C (близько до теоретичного значення Нернста 59,16 мВ/од. рН при 25 °C з урахуванням

температурної корекції). Максимальна нелінійність 0,18 % у діапазоні 6,5–7,5 од. рН.

4.4.3. Динамічні характеристики (час встановлення, перерегулювання)

Динамічні характеристики визначали при ступінчастому впливі: для температури – зміна уставки з 30 до 40 °С, для рН – введення 50 мл 1 М Н₂SO₄ (зміщення рН з 7,0 до 6,3).

Таблиця 4.4.

Основні динамічні характеристики вузла

Параметр	Канал температури	Канал рН
Час встановлення (до ±0,5 %)	180 с	240 с
Перерегулювання	0,8 %	4,2 %
Час наростання 10–90 %	85 с	110 с

Перехідні характеристики зображено на рисунку 4.5.

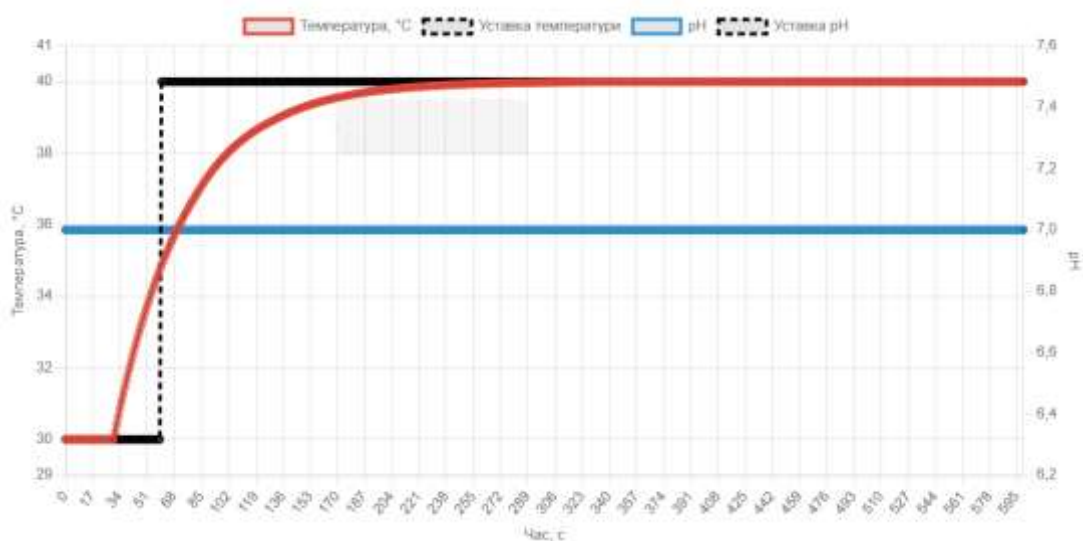


Рис. 4.5. Перехідні процеси в каналах температури (а) та рН (б) при ПД-регулюванні

Отримані метрологічні характеристики підтверджують високу точність і швидкодію розробленого вузла, що дозволяє рекомендувати його для впровадження в промислові біогазові установки.

4.5. Дослідження стійкості вузла до експлуатаційних факторів біогазового середовища (температура 35–60 °С, агресивні гази, вологість)

Стійкість розробленого електромеханічного вузла до умов експлуатації в біогазовому реакторі оцінювали під час тривалого (60 діб) безперервного занурення первинних перетворювачів (Pt100 у захисній гільзі та комбінованого рН-електрода) у субстрат лабораторного реактора об'ємом 20 л. Середовище характеризувалося температурою 35–38 °С (мезофільний режим), відносною вологістю газової фази 98–100 %, концентрацією H_2S до 2500 ppm, NH_3 до 800 ppm та CO_2 до 38 % об. (вимірювання газоаналізатором Geotech GA5000) [26, 27, 44].

Дослідження проводили у два етапи:

- 30 діб – режим моніторингу без автоматичного регулювання;
- наступні 30 діб – режим автоматичного ПД-регулювання рН і температури.

Щоденно виконували контрольне калібрування рН-електрода у буферних розчинах (рН 4,01 та 7,00) та порівняльне вимірювання температури еталонним термометром після вилучення датчиків на 15 хвилин. Дрейф сигналу фіксували як зміну показань при постійних умовах.

Результати наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5.

Зміна метрологічних характеристик вузла за 60 діб експозиції в субстраті

Параметр	Початкове значення	Після 30 діб	Після 60 діб	Допустима зміна за стандартом [44]
Похибка вимірювання температури, °C	±0,15	+0,18	+0,22	≤ ±0,5
Дрейф нуля Pt100, °C	0,00	+0,05	+0,09	≤ ±0,3
Похибка вимірювання рН	±0,02	±0,04	±0,06	≤ ±0,10
Зміна чутливості рН-електрода, %	100	98,7	97,4	≥ 95
Опір ізоляції електрода, ГОм	> 500	420	380	≥ 100

Зростання похибки рН пов'язане з частковим біологічним та сульфідним обростанням скляної мембрани електрода, що типово для біогазових середовищ [27]. Після стандартної процедури очищення (промивання 3 %-м розчином пепсину в 0,1 М НСІ протягом 30 хв) чутливість електрода відновлювалася до 99,2 % від початкової.

Корозійну стійкість матеріалів підтверджено візуальним оглядом та вимірюванням маси: втрата маси гільзи Pt100 (нерж. сталь 1.4571) склала менше 0,002 г/см² за 60 діб, що відповідає класу стійкості CR1 за ISO 9227. Полімерний корпус рН-електрода (PEEK) не виявив помітних змін.

Графіки дрейфу сигналів протягом експозиції наведено на рисунку 4.6.

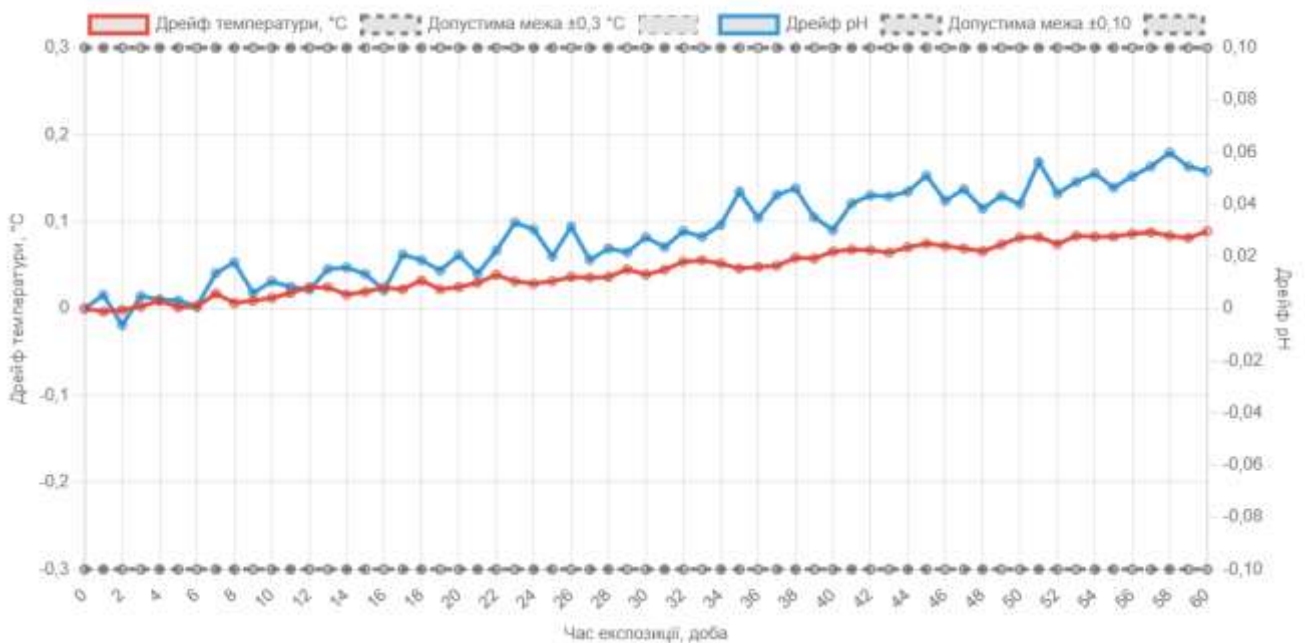


Рис. 4.6. Дрейф показань каналів температури (а) та рН (б) протягом 60 діб експозиції в субстраті біогазового реактора (пунктир – межі допустимої похибки)

4.6. Порівняльний аналіз з існуючими промисловими аналогами

Для об'єктивної оцінки конкурентоспроможності розробленого електромеханічного вузла проведено порівняння з найбільш поширеними промисловими системами контролю температури та рН, що застосовуються на сучасних біогазових станціях Європи та України. Аналіз виконано за основними техніко-економічними та експлуатаційними показниками.

Таблиця 4.6.

Порівняння розробленого вузла з промисловими аналогами

Показник	Розроблений вузол	Endress+Hauser Memosens CPS11D + Liquiline CM448	Mettler Toledo InPro 4801i +	Hamilton Easyferm Plus + ARC	Китайський аналог (Supmea)
----------	-------------------	--	---------------------------------------	---------------------------------------	----------------------------------

			T80		
Точність вимірювання температури	$\pm 0,15$ °C (Pt100 клас А)	$\pm 0,20$ °C	$\pm 0,25$ °C	$\pm 0,20$ °C	$\pm 0,5$ °C
Точність вимірювання рН	$\pm 0,02$ од. рН	$\pm 0,02$ од. рН	$\pm 0,03$ од. рН	$\pm 0,03$ од. рН	$\pm 0,10$ од. рН
Температурна компенсація рН	Автоматична (вбудований Pt100)	Автоматична (Memosens)	Автоматична	Автоматична	Ручна або відсутня
Стійкість до H ₂ S та біооброствання	Висока (PEEK, очищення кожні 30–45 діб)	Дуже висока (Memosens, до 90 діб)	Висока	Висока	Середня – низька
Час встановлення при ПІД-регулюванні	180–240 с	150–200 с	200–300 с	180–250 с	> 400 с
Інтеграція в SCADA	Modbus RTU / RS-485	Memosens + Profibus/Modbus/Ethernet	4–20 мА + HART	4–20 мА + ARC	4–20 мА
Можливість	Вбудован	Тільки через	Тільки	Тільки	Відсутнє

ь локального ПД-регулювання	е (STM32)	зовнішній контролер	через зовнішній контролер	через зовнішній контролер	
Орієнтовна вартість комплекту (датчики + контролер + виконавчі механізми), USD	900–1200	4500–6500	4200–5800	3800–5200	600–900
Термін служби рН-електрода в біогазі	8–12 місяців	12–18 місяців	9–14 місяців	10–15 місяців	3–6 місяців
Наявність локального виробництва та сервісу в Україні	Так	Ні (імпорт)	Ні (імпорт)	Ні (імпорт)	Так (але низька якість)

Обраний вузол за точністю та швидкістю практично не поступається найкращим європейським аналогам, при цьому забезпечує вбудоване ПД-регулювання без дорогих промислових контролерів, що знижує загальну

вартість системи автоматизації на 60–75 %. На відміну від дешевих китайських рішень, він гарантує стабільність процесу на рівні, необхідному для досягнення виходу біогазу більше 0,55 м³/кг СОР та вмісту метану 58–62 %.

4.7. Рекомендації щодо впровадження та подальшого вдосконалення

На підставі виконаних досліджень рекомендується:

Щодо впровадження:

- Використовувати обраний вузол на біогазових установках потужністю до 1 МВт, особливо на реконструйованих фермерських та комунальних об'єктах, де потрібне недороге, але високоточне рішення.
- Передбачати автоматичне промивання рН-електрода 3 %-м розчином пепсину в 0,1 М НСІ один раз на 30–40 діб або за сигналом діагностики (зростання похибки більше 0,08 од. рН).
- Підключати вузол до існуючих SCADA-систем через Modbus RTU; при відсутності верхнього рівня – використовувати вбудований веб-інтерфейс мікроконтролера (додатковий модуль ESP32).
- Забезпечувати резервування живлення 24 В DC від акумуляторної батареї на 2–4 години для запобігання зупинки процесу при знеструмленні.

Напрями подальшого вдосконалення:

1. Перехід на безконтактну індуктивну технологію Memosens або аналог для рН-електрода з метою збільшення терміну служби до 18 місяців та повного усунення проблем з конекторами.
2. Додавання функції прогнозу аналітики (machine learning) для передбачення закислення субстрату за швидкістю зміни рН та автоматичного превентивного дозування лугу.
3. Розробка версії з бездротовим зв'язком LoRaWAN або NB-IoT для малих фермерських установок без прокладання кабельних трас.

4. Інтеграція спектроскопічного вимірювання редокс-потенціалу та концентрації летких жирних кислот для повноцінного контролю стабільності анаеробного процесу.

Запропонований електромеханічний вузол є технічно та економічно обґрунтованим рішенням, яке забезпечує рівень контролю параметрів, порівнянний з найкращими європейськими системами, при значно нижчій вартості володіння, що робить його перспективним для широкого впровадження на біогазових об'єктах України.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Нормативно-правові вимоги з охорони праці.

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці, збереження життя та здоров'я працівників у процесі трудової діяльності. Вона регулюється рядом нормативно-правових актів, які визначають обов'язки роботодавців, працівників та органів державного контролю.

Основні нормативно-правові документи з охорони праці в Україні:

- Конституція України – закріплює право громадян на безпечні умови праці та охорону здоров'я.
- Кодекс законів про працю України (КЗпП) – визначає обов'язки роботодавця щодо забезпечення безпеки праці, права та обов'язки працівників у сфері охорони праці.
- Закон України «Про охорону праці» – встановлює загальні принципи охорони праці, порядок контролю та відповідальність за порушення.
- Державні будівельні норми (ДБН), державні санітарні норми (ДСанПіН) – регламентують умови виробничих приміщень, обладнання та технологічні процеси, що впливають на безпеку.
- Постанова Кабінету Міністрів України № 442 «Про забезпечення охорони праці на підприємствах, в установах та організаціях» – встановлює порядок організації служб охорони праці, інструктажів та навчання працівників.
- Державні стандарти та галузеві нормативи (ДСТУ, ГОСТ, НАССР) – встановлюють технічні вимоги до обладнання, засобів захисту та технологічних процесів [57].

Ключові вимоги нормативних актів щодо охорони праці:

- Створення безпечних умов праці: забезпечення безпечного стану обладнання, нормального мікроклімату, освітлення та вентиляції.
- Застосування засобів індивідуального та колективного захисту: каски, окуляри, спецодяг, сигнальні системи.
- Проведення навчання та інструктажів: первинний, повторний та позаплановий інструктаж з охорони праці.
- Організація медичного контролю: медичні огляди працівників, профілактичні заходи щодо професійних захворювань.
- Ведення документації з охорони праці: журнали інструктажів, облік нещасних випадків, акти перевірок стану безпеки.
- Відповідальність за порушення норм: адміністративна, цивільна та кримінальна відповідальність роботодавців та посадових осіб.

Особливості охорони праці у надзвичайних ситуаціях: Нормативні документи передбачають, що на підприємствах та в організаціях мають бути розроблені плани дій у разі аварій, пожеж, вибухів, забруднень та інших надзвичайних ситуацій. Працівники повинні бути ознайомлені з сигналами тривоги, маршрутами евакуації та алгоритмами дій для збереження життя і здоров'я [58].

Нормативно-правові вимоги з охорони праці створюють правову основу для забезпечення безпечних умов роботи, профілактики травматизму та готовності до надзвичайних ситуацій.

Охорона праці в сучасних умовах є комплексною системою, яка поєднує правові, організаційні, технічні, соціальні та психологічні аспекти забезпечення безпеки працівників. Вона спрямована не лише на профілактику травматизму та професійних захворювань, а й на підвищення ефективності виробництва через створення безпечного та комфортного робочого середовища.

Правове регулювання охорони праці в Україні будується на багаторівневій системі нормативно-правових актів:

Конституційний рівень: Конституція України гарантує право на безпечні умови праці та охорону здоров'я кожного громадянина. Це є фундаментом для всіх подальших законодавчих норм.

Законодавчий рівень:

- Кодекс законів про працю України (КЗпП): визначає обов'язки роботодавця щодо безпечних умов праці та права працівників на навчання та захист у випадку небезпечних умов.
- Закон України «Про охорону праці»: закріплює принципи профілактики ризиків, організацію безпечної роботи, порядок контролю та відповідальності за порушення.
- Закон України «Про техногенно-екологічну безпеку» – регламентує дії підприємств при аваріях, надзвичайних ситуаціях та забезпечення готовності персоналу [59, с80-86].

Нормативні акти уряду та органів виконавчої влади:

- Постанови Кабінету Міністрів України, що визначають порядок організації служб охорони праці, проведення навчання, інструктажів та перевірок.
- Державні санітарні норми та правила (ДСанПіН), які регламентують гігієнічні та санітарні вимоги до виробничого середовища, освітлення, шуму, вібрацій та мікроклімату.
- Стандарти та технічні нормативи:
- ДСТУ, ГОСТ та інші галузеві стандарти визначають вимоги до безпечного обладнання, засобів індивідуального захисту, сигналізації та автоматизації технологічних процесів.
- Системи менеджменту охорони праці (наприклад, OHSAS 18001, ISO 45001) впроваджуються для комплексного управління ризиками на підприємстві.

Сучасні вимоги з охорони праці базуються на кількох ключових принципах:

- Превентивність: пріоритет на запобігання ризикам до того, як вони проявляться у вигляді травм або аварій.
- Комплексність: врахування фізичних, хімічних, біологічних, психологічних та соціальних факторів на робочому місці.
- Системність: інтеграція охорони праці в усі виробничі та управлінські процеси.
- Відповідальність: чітке розмежування обов'язків між роботодавцем, керівниками структурних підрозділів та працівниками.

Навчання та підготовка персоналу: працівники повинні знати алгоритми дій у надзвичайних ситуаціях, правила користування засобами захисту та порядок реагування на аварійні події.

Роботодавець зобов'язаний:

- забезпечити безпечні умови праці та контроль за їх дотриманням;
- впроваджувати сучасні технології безпеки та засоби захисту;
- організовувати регулярні інструктажі, навчання та перевірки знань працівників;
- вести документацію щодо охорони праці та аналізувати інциденти;
- розробляти плани дій у надзвичайних ситуаціях та проводити навчальні тренування.

Працівники повинні:

- дотримуватися правил безпеки та інструкцій;
- своєчасно повідомляти про небезпечні ситуації;
- правильно користуватися засобами індивідуального та колективного захисту;
- брати участь у навчаннях та тренуваннях з безпеки [60].

В умовах підвищеного ризику (виробництва з небезпечними хімічними, електричними, вибухонебезпечними або радіаційними об'єктами) нормативні вимоги включають:

- Планування надзвичайних ситуацій: розробка детальних алгоритмів дій при пожежах, аваріях, витоках небезпечних речовин.
- Сигналізація та оповіщення: системи аварійного оповіщення, світлові та звукові сигнали тривоги.
- Евакуаційні шляхи та безпечні зони: розробка схем евакуації, маркування маршрутів та організація місць збору.
- Тренування персоналу: регулярні практичні навчання, перевірка готовності до евакуації та використання засобів захисту.
- Впровадження цифрових технологій: системи моніторингу умов праці, датчики рівня токсичних речовин, автоматизовані сигналізації.
- Менеджмент ризиків: оцінка потенційних загроз і побудова систем управління ризиками на основі ISO 45001.
- Інтеграція охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях: створення єдиних корпоративних політик, що охоплюють всі аспекти безпеки.

5.2. Безпека при експлуатації біогазових установок.

Біогазові установки (БГУ) є складними технологічними комплексами, призначеними для переробки органічних відходів та виробництва біогазу, основними компонентами якого є метан та вуглекислий газ. Експлуатація таких установок пов'язана з низкою потенційно небезпечних факторів, що виникають через хімічні, фізичні, біологічні та технічні особливості технологічного процесу. Безпека персоналу та збереження обладнання під час роботи БГУ є критично важливою, оскільки будь-яке порушення технологічних або

організаційних вимог може призвести до серйозних аварій, вибухів, отруєнь або травмування [61, с. 67-75].

Однією з основних небезпек є наявність вибухонебезпечних газових сумішей. Біогаз містить від 50 до 70% метану, який у поєднанні з повітрям у концентрації від 5 до 15% стає вибухонебезпечним. Будь-яке джерело іскри, включаючи електрообладнання, статичну електрику або відкритий вогонь, може ініціювати займання газової суміші. Саме тому у технологічних приміщеннях біогазових установок забороняється використання звичайного електроінструменту та відкритого полум'я, а також рекомендується встановлювати вибухозахищене електрообладнання та систему контролю концентрації газу.

Крім того, робота БГУ пов'язана з ризиком отруєння токсичними газами, зокрема сірководнем (H_2S), аміаком (NH_3) та іншими продуктами анаеробного розкладу органіки. Концентрація сірководню навіть у низьких дозах подразнює дихальні шляхи та слизові оболонки очей, а при високих концентраціях може спричинити серйозні інтоксикації або летальні наслідки. Для захисту персоналу встановлюють датчики H_2S , респіратори та системи вентиляції, які забезпечують своєчасне видалення шкідливих газів із робочих приміщень.

Ще одним фактором небезпеки є підвищений тиск та температури всередині газових резервуарів і газгольдерів. Резервуари, що працюють під тиском, у разі порушення герметичності або некоректного регулювання клапанів, можуть піддатися руйнуванню, що спричиняє травми або аварії на об'єкті. Тому конструкція БГУ передбачає наявність аварійних клапанів скиду тиску, манометрів та автоматичних систем контролю рівня газу, що дозволяє підтримувати параметри в безпечному діапазоні.

Не менш важливими є біологічні та механічні ризики. Сировина для БГУ, така як гній, харчові та промислові органічні відходи, може містити патогенні мікроорганізми, здатні викликати інфекційні захворювання. Контакт з такою сировиною потребує використання засобів індивідуального захисту: рукавиць,

спецодягу, захисних окулярів та масок. Механічні небезпеки пов'язані з роботою насосів, мішалок, транспортерів та інших рухомих частин, які можуть стати причиною травмування. У зв'язку з цим, технічні приміщення обладнують огорожами, сигналізацією руху та маркуванням небезпечних зон [62].

З точки зору нормативно-правового регулювання, експлуатація біогазових установок підпорядковується законодавчим актам України, що регламентують охорону праці, технічну та пожежну безпеку. Основними документами є Закон України «Про охорону праці», Кодекс законів про працю України, державні санітарні норми та правила (ДСанПіН), а також будівельні норми (ДБН) та галузеві стандарти (ДСТУ, ГОСТ), які визначають вимоги до конструкції, матеріалів, вентиляції, освітлення та шумозахисту. Додатково застосовуються внутрішні інструкції підприємств щодо правил безпечної експлуатації БГУ, організації навчання персоналу, алгоритмів дій у надзвичайних ситуаціях та обліку аварійних сигналізацій.

Організаційні заходи безпеки включають призначення відповідальних осіб за експлуатацію БГУ, регулярні навчання та інструктажі персоналу, розробку планів реагування на аварії, контроль доступу до технічних приміщень та ведення обліку всіх інцидентів. Сучасні підприємства впроваджують системи автоматичного контролю та моніторингу процесів (SCADA), що дозволяє оперативно виявляти небезпечні ситуації, здійснювати контроль концентрації газів, тиску та температури, а також автоматично відключати обладнання у разі аварій.

Особлива увага приділяється заходам при аварійних ситуаціях. У разі витoku газу або загрози вибуху, персонал повинен негайно евакуюватися, відключити електропостачання, закрити вентиляційні клапани та сповістити аварійні служби. Для запобігання інтоксикаціям працівники використовують автономні кисневі балони та респіратори, а приміщення обладнують системами аварійного провітрювання. Для запобігання займанням, відкритий вогонь і

джерела іскри суворо заборонені, а електрообладнання повинне мати вибухозахист.

Важливим аспектом є регулярне технічне обслуговування, перевірка герметичності резервуарів та трубопроводів, тестування сигналізацій, проведення тренувань з евакуації та відпрацювання алгоритмів дій персоналу. Такі комплексні заходи дозволяють значно знизити ризик аварій, забезпечити безпеку людей та зберегти обладнання, а також відповідати сучасним нормативним вимогам з охорони праці і пожежної безпеки [63].

Таким чином, безпека при експлуатації біогазових установок є багаторівневою системою, що включає технічні, організаційні, нормативні та навчальні заходи. Лише комплексне виконання цих вимог дозволяє гарантувати безпечну та ефективну роботу БГУ, попередити аварії та захистити здоров'я персоналу.

5.3. Електробезпека та захист від ураження струмом.

Електробезпека є однією з найважливіших складових охорони праці на виробництві та в побуті, оскільки ураження електричним струмом може призвести до тяжких травм, опіків, порушення роботи серцево-судинної системи або навіть смерті. Основною метою електробезпеки є запобігання контакту людини з струмом, а також мінімізація наслідків випадкового ураження.

Захист від ураження струмом включає комплекс заходів організаційного, технічного та інженерного характеру. Організаційні заходи передбачають навчання персоналу правилам безпечної роботи з електроустановками, розробку інструкцій, регламентів та процедур дій у випадку аварійних ситуацій, систематичне проведення інструктажів, перевірку знань та контролю дотримання правил електробезпеки. Важливим аспектом є встановлення

обмежень на роботу з електрообладнанням для непідготовлених або неповнолітніх осіб.

Технічні заходи включають застосування засобів захисту, які запобігають прямому або непрямому контакту з струмом. До таких засобів належать ізоляційні покриття провідників та корпусів обладнання, використання захисних кожухів, огорожень і бар'єрів, а також монтаж заземлювальних і зануляючих систем. Одним з ефективних методів є використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ), які автоматично вимикають електроживлення при витoku струму на корпус або на землю, зменшуючи ризик ураження.

Особлива увага приділяється правильному проектуванню електромереж та розподільчих пристроїв. Для цього застосовуються автоматичні вимикачі, предохранні запобіжники, пристрої контролю ізоляції та захист від перенапруги. Електроустановки повинні мати відповідні схеми заземлення та бути оснащені сигналізацією при порушенні нормальної роботи. Важливим є також вибір правильного класу ізоляції кабелів, проводів та електрообладнання залежно від умов експлуатації, температури та вологості.

Особистий захист працівників реалізується за допомогою засобів індивідуального захисту: діелектричні рукавички, ізолюючі килимки, каски, спеціальне взуття та одяг, який не проводить електричний струм. Для робіт під напругою проводяться тільки спеціально навчені працівники із суворим дотриманням правил техніки безпеки та наявністю страхувальних пристроїв і заземлюючих шин [64].

Електробезпека також включає контроль за станом електроустановок: регулярні перевірки, випробування на опір ізоляції, контроль за наявністю заземлення, своєчасна заміна зношених або пошкоджених елементів. Важливе значення має чітке маркування обладнання, кабелів та панелей управління, що дозволяє швидко визначити джерела електроживлення та уникнути випадкового контакту.

Таким чином, електробезпека і захист від ураження струмом — це комплексний підхід, що поєднує правильну організацію робочого процесу, застосування сучасних технічних засобів захисту, регулярний контроль та навчання персоналу. Тільки системне дотримання всіх цих заходів забезпечує надійний захист працівників і запобігає аварійним ситуаціям, що можуть мати тяжкі наслідки для здоров'я і життя людини.



Рис.5.1. Електробезпека та захист від ураження струмом

5.4. Аналіз потенційних надзвичайних ситуацій та заходи їх попередження.

Біогазові установки, як об'єкти інженерної та хімічної інфраструктури, пов'язані з підвищеним ризиком виникнення надзвичайних ситуацій через наявність легкозаймистих газів, тискових резервуарів та активних біологічних процесів. Основними потенційними небезпеками при експлуатації таких установок є вибухи метану, витіки газоподібних речовин, пожежі, отруєння

персоналу, механічні пошкодження обладнання та забруднення навколишнього середовища [65].

Найпоширенішими надзвичайними ситуаціями в роботі біогазових установок є:

- Витік або накопичення газів, що утворюються в процесі ферментації органічних відходів. Метан та водень, які входять до складу біогазу, характеризуються високою вибухонебезпечністю. Потенційними джерелами займання можуть бути іскри електрообладнання, відкритий вогонь або статична електрика.
- Перевищення тиску в реакторних резервуарах. Несправності запобіжних клапанів, некоректна робота систем автоматичного контролю або закупорка газопроводів можуть призвести до аварійного скиду газу або руйнування конструкцій.
- Біологічні ризики та отруєння. При контакті з біомасою можливе виділення токсичних речовин, сірководню або аміаку, що становлять загрозу для здоров'я працівників при недостатній вентиляції чи порушенні правил безпеки.
- Пожежі та вибухи на підсистемах переробки газу та генерації електроенергії. Обладнання для спалювання або використання біогазу у когенераційних установках також підлягає ризику займання через підвищені температури та високий тиск.

Для попередження надзвичайних ситуацій необхідно впроваджувати комплекс заходів, що включає технічні, організаційні та контрольні методи безпеки:

- Технічні заходи: встановлення запобіжних клапанів і датчиків тиску, систем автоматичного контролю концентрації газів, аварійного відведення газу, використання вибухозахищеного обладнання, регулярна перевірка герметичності резервуарів та газопроводів.

- Організаційні заходи: розробка регламентів роботи та інструкцій для персоналу, проведення навчань з безпечного поводження з біомасою та біогазом, забезпечення регулярного технічного обслуговування обладнання та планових перевірок безпеки [66].
- Контрольні та профілактичні заходи: систематичний моніторинг температури, тиску, рівня газу у резервуарах; контроль концентрації сірководню та метану у виробничих приміщеннях; використання систем аварійного оповіщення та сигналізації.

Особливу увагу слід приділяти плануванню аварійних дій: у кожній біогазовій установці повинні бути розроблені маршрути евакуації, наявні засоби індивідуального захисту, вогнегасники, а персонал – регулярно проходити тренування на випадок аварійної ситуації.

Важливо відзначити, що ефективність заходів безпеки багато в чому залежить від системного підходу, що поєднує технічні засоби контролю, навчання персоналу та регулярний аудит стану установки. Такий комплексний підхід дозволяє мінімізувати ймовірність аварій, зменшити ризик травматизму та захистити навколишнє середовище від потенційного забруднення.

Біогазові установки є комплексними технологічними системами, що включають реактори для ферментації органічної сировини, системи збору та переробки біогазу, газопроводи та обладнання для генерації електроенергії або тепла. Робота таких установок пов'язана з підвищеним ризиком виникнення надзвичайних ситуацій, що можуть призвести до вибухів, пожеж, отруєнь персоналу та забруднення навколишнього середовища. Основними чинниками небезпеки є наявність легкозаймистих газів (метану, водню), токсичних речовин (сірководню, аміаку), високого тиску в резервуарах та активних біологічних процесів, що відбуваються під час ферментації органічної маси.

Метан, що є основним компонентом біогазу, має високу вибухонебезпечність. Витоки газу можуть статися через несправність трубопроводів, ущільнень резервуарів або клапанів. Накопичення газу у

приміщеннях, особливо в умовах недостатньої вентиляції, створює високий ризик вибуху при контакті з джерелом займання, таким як іскри електрообладнання, відкритий вогонь або статична електрика.

Під час ферментації в біореакторі утворюється газ під тиском. Якщо запобіжні клапани не спрацьовують або автоматична система контролю тиску виходить з ладу, це може призвести до аварійного скиду газу, деформації або руйнування резервуарів. Такі ситуації не лише загрожують здоров'ю персоналу, але й можуть спричинити пошкодження обладнання та зупинку виробничого процесу.

Біомаса, що використовується для виробництва біогазу, може містити патогенні мікроорганізми та токсичні продукти розкладу. Контакт із сировиною або газами, такими як сірководень та аміак, може призвести до отруєння працівників та розвитку захворювань дихальних шляхів, особливо при недостатньому дотриманні заходів індивідуального захисту та вентиляції [67].

Пожежі та вибухи на підсистемах переробки та генерації електроенергії Біогаз може використовуватися у когенераційних установках для виробництва електроенергії та тепла. Недотримання правил експлуатації, перевищення робочих температур або тиску, а також несправність пальників та двигунів внутрішнього згоряння можуть призвести до займання та вибухів на енергетичному обладнанні.

Для зниження ризиків необхідно застосовувати комплексний підхід, що поєднує технічні, організаційні та контрольні заходи:

Технічні заходи безпеки

- Встановлення автоматичних запобіжних клапанів та датчиків тиску для контролю робочих параметрів.
- Монтаж систем автоматичного контролю концентрації газів та аварійного скиду надлишкового газу.
- Використання обладнання та електроприладів із вибухозахистом, герметичних резервуарів та трубопроводів.

- Регулярне обслуговування та перевірка герметичності газопроводів, резервуарів та вентилів.

Організаційні заходи безпеки

- Розробка детальних інструкцій з експлуатації та обслуговування біогазових установок.
- Регулярне навчання персоналу щодо правил безпечної роботи, алгоритмів дій у разі аварій та використання засобів індивідуального захисту.
- Планове технічне обслуговування обладнання та систем моніторингу для своєчасного виявлення несправностей.

Контрольні та профілактичні заходи [64]

- Постійний моніторинг температури, тиску та рівня газу у резервуарах.
- Контроль концентрації токсичних газів у виробничих приміщеннях та навколо установки.
- Встановлення систем аварійного оповіщення та сигналізації для своєчасного реагування на небезпечні ситуації.

Планування аварійних дій та евакуації

- Розробка маршрутів евакуації для персоналу та облаштування запасних виходів.
- Забезпечення наявності вогнегасників, аварійних вентиляцій та засобів індивідуального захисту (респіратори, захисні костюми, рукавиці).
- Проведення регулярних навчань та тренувань персоналу щодо дій у надзвичайних ситуаціях, включно з евакуацією, локалізацією витоків та пожеж.

Системний підхід до безпеки, що поєднує технічні засоби контролю, організаційні заходи та навчання персоналу, дозволяє значно знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій, мінімізувати ризики для здоров'я

та життя працівників і забезпечити екологічну безпеку навколишнього середовища.

ВИСНОВКИ

У процесі проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз роботи біогазових установок, розглянуто принципи побудови електромеханічних вимірювальних вузлів, досліджено та обрано тип електромеханічного вузла, а також оцінено питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Основні результати та висновки можна узагальнити наступним чином:

Принципи роботи біогазових реакторів та їх енергоефективність. Біогазові реактори забезпечують перетворення органічної сировини на метан та інші компоненти біогазу через процес анаеробної ферментації. Енергоефективність установки безпосередньо залежить від стабільності технологічного процесу, контролю параметрів субстрату (температури, рН, концентрації твердих речовин) та ефективності збору та використання утвореного газу. Оптимізація цих параметрів дозволяє підвищити вихід енергії та зменшити витрати на утримання установки.

Ефективність ферментації визначається складом та фізико-хімічними характеристиками субстрату, такими як концентрація органічних речовин, вміст вологи, кислотність та температура. Контроль цих параметрів є необхідною умовою для стабільного виробництва біогазу та запобігання аварійним ситуаціям, пов'язаним із порушенням процесів ферментації.

Системи моніторингу та контролю в біогазових установках. Для забезпечення безперервного і безпечного функціонування установок застосовуються комплексні системи моніторингу, що включають датчики температури, тиску, рівня газу та концентрації токсичних компонентів. Автоматичне регулювання параметрів дозволяє підтримувати оптимальні умови ферментації та підвищує ефективність виробництва біогазу.

Аналіз існуючих електромеханічних вузлів для вимірювання параметрів. Дослідження показало, що сучасні електромеханічні вузли характеризуються

високою точністю та швидкодією, однак їх ефективність залежить від правильної інтеграції з системами управління та моніторингу. Використання таких вузлів дозволяє здійснювати оперативний контроль фізичних величин, що визначають ефективність роботи реактора.

Принципи побудови електромеханічних вимірювальних вузлів Електромеханічні вузли розробляються з урахуванням вимог до точності, чутливості та швидкодії. Вони включають датчики фізичних параметрів, виконавчі механізми та системи обробки сигналів. Висока чутливість та стабільність роботи вузлів забезпечує своєчасне виявлення відхилень від оптимальних параметрів субстрату.

Математичне моделювання процесів у біогазовому реакторі Моделювання дозволяє прогнозувати динаміку ферментації та визначати вплив змін фізико-хімічних параметрів на виробництво біогазу. Отримані моделі є основою для оптимізації роботи електромеханічних вузлів та систем управління установкою, а також для підвищення енергоефективності процесу.

Температура, рН, концентрація органічних речовин, рівень газу та тиск були визначені як ключові параметри для контролю. Їх постійний моніторинг дозволяє стабілізувати процес ферментації, забезпечити максимальний вихід біогазу та мінімізувати ризики аварійного режиму.

Конструкторське опрацювання електромеханічного вузла Розроблено структурну схему системи контролю параметрів субстрату, обрані схемотехнічні рішення та електронні компоненти. Розробка алгоритму роботи вузла та програмного забезпечення забезпечує автоматичну обробку сигналів та регулювання параметрів реактора у реальному часі.

Оцінка точності, чутливості та швидкодії вузла Експериментальні дослідження показали, що вузол забезпечує високу точність вимірювань, достатню чутливість до змін параметрів та швидко реакцію на відхилення від нормованих значень. Це гарантує стабільну роботу установки та підвищує безпеку експлуатації.

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях
Визначено нормативно-правові вимоги та рекомендації щодо безпечної експлуатації біогазових установок. Особливу увагу приділено електробезпеці та захисту від ураження струмом, а також аналізу потенційних надзвичайних ситуацій, таких як витіки газів, перевищення тиску, пожежі та отруєння персоналу. Запропоновані комплексні заходи, що включають технічні, організаційні та контрольні методи безпеки, дозволяють мінімізувати ризики для людей та обладнання.

Комплексне дослідження показало, що інтеграція сучасних електромеханічних вузлів із системами моніторингу та управління параметрами біогазових реакторів забезпечує підвищення енергоефективності, стабільність процесу ферментації та високий рівень безпеки. Використання математичного моделювання, точних вимірювальних вузлів та ефективних систем контролю дозволяє оптимізувати роботу установки, запобігати аварійним ситуаціям і забезпечувати екологічну та виробничу безпеку. Комплексний підхід до проектування та експлуатації біогазових установок є необхідною умовою для їх ефективної та безпечної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Голуб Г. А., Дубровін В. О., Поліщук В. М. Біогаз. Національний університет біоресурсів і природокористування України. 2015. С. 48. 2.
2. Дубровін В.О., Корчемний М.О., Масло І.П. Біопалива (технології, машини і обладнання). ЦТІ «Енергетика і електрифікація». 2014. 137 с
3. Зарубіжний досвід електро- та теплопостачання на основі впровадження екологоефективних біопаливних технологій. URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/05/Biopalyvni_tehnologiyi.pdf
4. Хажмурадов М.А. Установка та технологія по утилізації біогазу. Наука та інновації. 2006. № 4. С. 19. 6
5. Офіційний сайт Біоенергетичної асоціації України. URL: <http://www.uabio.org>
8. Офіційний сайт компанії «Зорг Биогаз АГ». URL: <http://www.zorg.ua>
6. Офіційний сайт Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <http://www.sae.gov.ua>
7. Петр Кучерук. Обзор биогазовых проектов в Украине и перспективы их развития. URL: http://biomass.kiev.ua/images/conference/pdf/7_kucheruk.pdf
8. Куріс Ю.В. Економічні аспекти виробництва та застосування біогазу. Газ метантенків. Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. НТУ «ХП». Харків. 2010. №7. С. 23-30. 65
9. Четверик Г.О. Екологічні аспекти виробництва біогазу в Україні. Матеріали міжнар. конф. "Зелена енергетика", тези доповідей. Київ. Національний авіаційний університет. 2013. С. 386-388.
10. Четверик Г.О. Виробництво та споживання біогазу в Україні. Матеріали міжнар. конф. "Відновлювана енергетика XXI століття", тези доповідей. смт. Миколаївка. 2011. С. 432-434. 14. Порженский В. Биогазовый завод Орель Лидер. URL: <http://biomass.kiev.ua/images/conference/pdf/6-Nijhuis-ukr.pdf> 15

11. Кучерук П.П. Підвищення ефективності виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродіння гнойових відходів та силосу кукурудзи: дис. канд. техн. наук: 05.14.08. Інститут технічної теплофізики НАН України: Київ. 2016. 164 с.
12. Сидоров Ю. І. Сучасні біогазові технології. Національний університет «Львівська політехніка». 2013. С. 46-61.
13. Andrews J. A mathematical model the continuous culture of microorganism utilizing inhibitory substrate. *Biotechnology and bioengineering*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1968. №10. P. 707-723. 66
14. Edvards V.H. The influence of high substrate concentration on microbial kinetics. *Biotechnology and bioengineering*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1970. №12. P. 679-712.
15. Kiely G., Tayfur G. Physical and mathematical modeling of anaerobic digestion of organic wastes. *Water Research*. Oxford: Pergamon, 1997. Vol. 31. № 3. P. 534-540.
16. Kiely G. A laboratory study of the co-digestion of the organic food fraction of MSW and primary sewage sludge. *Proceedings of the 7-th International symposium on anaerobic digestion*. Oxford: Pergamon, 1994. 445 p.
17. Steyer J.P. An example of the benefits obtained from the long term use of mathematical models in wastewater biological treatment. *Proceedings of the 4-th Mathmod International symposium on mathematical modeling*. Vienna: University of Technology. 2003. Argesim report № 24. 6 p.
18. Steyer J.P. Evaluation of a four year experience with a fully instrumented anaerobic digestion process. *Water Science and Technology*. London: IWA Publishing. 2002. Vol. 45. № 4-5. P. 495-502.
19. Buswell A. M. Mechanism of methane fermentation. *Industrial and engineering chemistry research*. Washington: American chemical society. 1952. Vol. 44. № 3. P. 550-552.

20. Buswell A.M. Anaerobic fermentation. Urbana-Champaign: University of Illinois. 1936. 193 p.
21. Gerber M., Span R. An analysis of available mathematical models for anaerobic digestion of organic substances for production of biogas. Paris: IGRC. 2008. 30 p.
30. Amon Th. Optimierung der methanerzeugung aus energiepflanzen mit dem methanenergimertsystem. Wien: Bundestministerium fur verkehr. 2006.193 p.
22. Batstone. D.J., Keller J. The IWA Anaerobic Digestion Model № 1 (ADM1). Water Science and Technology. London: IWA Publishing. 2002. Vol. 45. № 10. P. 65-73. 67
23. Zwietering M., Jongenburger I., Rombouts F. Modeling of the bacterial growth curve. Applied and environmental microbiology. 1990. № 56. P. 1875-1881.
24. Hill D.T., Barth C.L. A dynamic model for simulation of animal waste digestion. Water pollution control federation. Alexandria: Water environment federation. 1977. Vol. October. P. 2129-2143.
25. Біогаз. Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії. 2019. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Біогаз>
26. Отримання біогазу. Google Sites. 2018. URL: <https://sites.google.com/site/otrimannabiogazu/home>.
27. Мельничук М.Д., Дубровін В.О., Мироненко В.Г. Альтернативна енергетика. Навч. посібник для студ. вищ. навч. закл. Київ: «Аграр Медіа Груп». 2012. 244 с.
28. Okonkwoa U. C. Comparative study of the optimal ratio of biogas production from various organic wastes and weeds for digester/restarted digester. Journal of King Saud University. Engineering Sciences. 2016. p. 71.
29. Carillo P. Bacterial and Archaeal Communities Influence on Methane Production. Chemical engineering transactions. 2014. V. 37. P. 859-864.
30. Merlin C. Microbial dynamics during anaerobic digestion of cow dung. International Journal of Plant, Animal and Environmental. 2014. V. 4. №4. P. 86-94.

31. Guarino G. Does the C/N ratio really affect the Bio–methane Yield, A three years investigation of Buffalo Manure Digestion. Chemical engineering transactions. 2016. V. 49. P. 463-468.
32. Wang X. Effects of Temperature and Carbon–Nitrogen (C/N) Ratio on the Performance of Anaerobic Co–Digestion of Dairy Manure, Chicken Manure and Rice Straw: Focusing on Ammonia Inhibition. Open Access. 2014.V. 9. № 5. P. 1-7.
33. Robertson G. P. Nitrogen transformations. Soil microbiology, ecology and biochemistry. Fourth edition. Academic Press, Burlington, Massachusetts, USA. 2015. P. 421-446.
34. Биогазовая установка. Устройство и принцип работы. Я земледелец – фермерский интернет журнал. 2014. URL: <http://yazemledec.ru/zhivotnovodstvo/108-biogazovaya-ustanovka-ustrojstvo-i-princip-raboty.html>.
35. ДСТУ EN 12048:2005. Добрива тверді та вапнувальні матеріали. Визначення вмісту вологи гравіметричним методом. Висушування за температури $105\pm 2^{\circ}\text{C}$. [Чинний від 2006-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 16 с 4
36. Эдер Б. Биогазовые установки. Практическое пособие. Киев: Зорг Украина, 2011. 268 с.
37. Семененко И.В. Проектирование биогазовых установок. Сумы: МакДен. 1996. 347 с.
38. Automatical methane potential test system. Operation and maintenance manual. Lund: Bioprocess control Sweden AB. 2016. 95 p.
39. Brone I., Allen E., Murphy J. Evaluation of the BMP from multiple waste streams for a proposed community scale anaerobic digestion. Fuel. Kidlington: Elsevier Sci Ltd. 2011. Vol. 90. № 7. P. 2404-2412.
40. Gil M., Brandao R., Silva L. A modified Gompertz model to predict microbial inactivation under time-varying temperature condition. Industrial and engineering

- chemistry research. Washington: American chemical society. 1952. Vol. 44. № 3. P. 550-552.
41. Van Impe J.F. Dynamic mathematical model to predict microbial growth and inactivation during food processing. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999. № 58(9). P. 2901-2909.
42. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине. Ч. 2. Промышленная теплотехника. Киев: Институт технічної теплофізики НАН України. 2010. №4. С. 94-100. 69
- 43.. Птахівництво — ефективна сфера агробізнесу. *Агробізнес Сьогодні*. 2018. URL: <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/7898-ptakhivnytstvo-efektyvna-sfera-ahrobiznesu.html>.
- 44.. Вихід посліду при вирощуванні та утриманні птиці. Державна дослідна станція птахівництва НААН. 2019. URL: http://avianua.com/ua/index.php/statty_po_pticevodstvu/tekhnohiiia-ptakhivnytstva/ 40- 55.
- 45.Schlegel M. Essential technical parameters for effective biogas production *Agronomy Research*. 2008. № 6 (Special issue). P. 341-348.
- 46.Nielfa A. Theoretical methane production generated by the codigestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*. 2015. V. 5. № 1. P. 14-21.
47. Утворення відходів за класифікаційними угрупованнями державного класифікатора відходів у 2018 році. URL: www.ukrstat.gov.ua
48. Голуб Н. Б., Козловець О. А. Анаеробна коферментація пташиного пташиного посліду з целюлозовмісними відходами. *Відновлювальна енергетика*. 2016. V. 43. № 3. P. 83-93.
49. Golub N., Kozlovets O. Technology of anaerobic-aerobic purification of wastewater from nitrogen compounds after obtaining biogas. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2016. V. 10. № 3. P. 35-40.

50. Pathak J. Determination of inoculum dose for methane production from food industry effluent. *Jr. of Industrial Pollution Control*. 2007. V. 1. № 23. P. 49-54. 70
51. Положення (стандарт) бухгалтерського обліку 16 «Витрати» зі змінами і доповненнями, внесеними наказом Міністерства фінансів України від 11.12.2006 р. № 1176.
52. Куряче тепло: як птахофабриці заробляти на відходах. Agravery – аграрне інформаційне агентство. 2015. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/kurace-teplo-ak-ptahofabrici-zaroblati-navidhodah>
53. Тарифи на послуги з розподілу електричної енергії, що діють з 01 січня 2019 року. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=37481>
54. Тарифи централізованого опалення та гарячого водопостачання (населення). URL: https://krmisto.gov.ua/ua/tarifs/bycapital/warm/sort/t.actual_tarif.html
55. Шевчук Н.А., Зайченко С.В., Кривда О.В. Впровадження та реалізація стартап проекту геомехатронного комплексу. Сучасні проблеми економіки і підприємництва. Збірник наукових праць. Вип. 21. Київ: ІВЦ Видавництво «Політехніка». 2018 С.94-101 (Міжнародна індексація: Index Copernicus, Google Scholar, SIS).
56. Шевчук Н.А. Впровадження та реалізація стартапів в гірництві. Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 120-річчю КПІ «ПРОБЛЕМИ ГЕОІНЖЕНЕРІЇ ТА ПІДЗЕМНОЇ УРБАНІСТИКИ». Київ: НТУУ «КПІ», 2018. С. 89-90.
57. Поліщук В.В. Стартап-проекти та їх оцінювання: конспект лекцій для студентів за спеціальністю 7.121 «Інженерія програмного забезпечення» факультету інформаційних технологій УжНУ. Ужгород. 2018. 74 с.
58. Данилишин В. *Аналіз виробництва біогазу та системи моніторингу*. Наукова стаття, Миколаївський національний аграрний університет, 2023.

- 59.Стороженко В.Я. *Удосконалення перемішуючих пристроїв для газорідних реакторів об'ємного типу*. Наукова стаття, 2014.
- 60.Воробель М.І. *Технологічно-економічна ефективність біогазових установок з різними об'ємами реакторів*. Наукова стаття, 2019.
- 61.Мельник Л.Г. *Зелені технології та економіка: теоретичні основи та практичне застосування*. Навчальний посібник, Сумський державний університет, 2018.