



КИЇВ – 2025  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
**електротехніки, електромеханіки та**  
**електротехнологій**

доц., к.т.н. \_\_\_\_\_ /**Окушко О.В.**/  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**  
**СТУДЕНТУ**

**Шклярському Яну Дмитровичу**

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо- наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Вдосконалення процесів анаеробного бродіння з використанням електрофізичних методів впливу»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 26.09.2024р. № 1665”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру \_\_\_\_\_ 15.05.2025

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: Технічна документація

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- 1.аналіз сучасного стану досліджень по вдосконаленню процесів анаеробного бродіння при виробництві біогазу;
2. формування загальної методики, конструктивно-технологічних схем і комплексу методів досліджень електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах;
3. проведення моделювання і експериментальних досліджень процесів біометаногенезу сумішей під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів та механічних коливань в біореакторах;
4. уточнення параметрів інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей та параметрів схеми заміщення занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача з метою підвищення енергоефективності і точності управління процесами електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах.

Перелік графічного матеріалу –презентація – наочні матеріали з результатами дослідження, алгоритми розрахунків і таблиці з отриманими результатами.

Дата видачі завдання 26.09.2024р.

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ **Заблудський М.М.**

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ **Шклярський Я. Д.**

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри електротехніки,  
електромеханіки та електротехнологій  
канд. техн. наук, доц. \_\_\_\_\_ Окушко О.В.  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ  
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Шклярському Яну Дмитровичу

Спеціальність **141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**  
Освітня програма - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
**другого (магістерського) рівня вищої освіти**

Орієнтація освітньої програми – **Освітньо- наукова**

Тема магістерської роботи **Вдосконалення процесів анаеробного бродіння з використанням електрофізичних методів впливу**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “14” грудня 2023р.

№ 2269.С

Термін подання завершеної роботи на кафедру

Вихідні дані до магістерської роботи –

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. аналіз сучасного стану досліджень по вдосконаленню процесів анаеробного бродіння при виробництві біогазу;
2. формування загальної методики, конструктивно-технологічних схем і комплексу методів досліджень електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах;
3. проведення моделювання і експериментальних досліджень процесів біометаногенезу сумішей під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів та механічних коливань в біореакторах;
4. уточнення параметрів інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей та параметрів схеми заміщення занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача з метою підвищення енергоефективності і точності управління процесами електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах.

Перелік графічного матеріалу – презентація – наочні матеріали з результатами дослідження, алгоритми розрахунків і таблиці з отриманими результатами.

Дата видачі завдання “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024р.

**Керівник магістерської роботи** \_\_\_\_\_ **Заблудський М.М.**

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_ **Шклярський Я. Д.**

## РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи: робота вміщує вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел, що налічує 61 позицію. Повний обсяг роботи складає 86 сторінок.

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі вдосконалення процесів анаеробного бродіння в біогазових реакторах методами електрофізичного впливу. Розроблені два варіанти конструктивного виконання занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача, що виконує одночасно функції асинхронного приводу, пристрою, що перемішує, індукційного нагрівача і електромагнітного осцилятора.

Запропоновані методи досліджень процесів біометаногенезу під керуванням дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань. Сформовані принципові положення щодо розробки методик вимірювання потенціалів елементів іонних каналів, які можуть бути застосовані при дослідженнях процесів анаеробного бродіння з використанням електрофізичних методів впливу.

Проведення експериментів з низькочастотним магнітним полем, що обертається, формує два напрямки розвитку біогазового виробництва: виробництво високоякісного біогазу (> 50% метану) шляхом стимуляції метаногенних мікроорганізмів в електромагнітних полях; скорочення часу ферментації та неявне підвищення енергоефективності біогазових установок.

До біотропних параметрів низькочастотного магнітного поля, що обертається, визначальними біологічно значущі фізико-хімічні механізми дії фізичного фактора на субстрат слід вважати: інтенсивність магнітного поля; кругову частоту; градієнт поля; частоту та форму імпульсу; тривалість дії.

Встановлено інгібуючу дію на активність метанових бактерій високої напруженості електричного поля, що створюється електричним нагрівальним кабелем у біосистемі реакторів, виконаних із пластику. Застосування електричного нагріву всередині та зовні біореактора допустиме за наявності

екранування, яке забезпечує допустиму для колоній метанових бактерій напруженість постійного електричного поля (не більше 200 В/м).

Важливим результатом досліджень є експериментальне підтвердження сприятливого впливу магнітного поля на діяльність метанових бактерій при впливі статичного магнітного поля або магнітодинамічного поля з частотою 2 Гц та періодичним перемішуванням субстрату (до трьох разів на добу).

Ключові слова: магнітне поле, мікробні електролізні комірки, електромеханічна система, біоелектрохімічні системи, магнітна індукція, напруженість електричного поля

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ВДОСКОНАЛЕННЮ ПРОЦЕСІВ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БІОГАЗУ	12
1.1. Технологічні особливості виробництва біогазу	13
1.2. Необхідність вирішення проблеми підвищення якості біогазу і продуктивності біореакторів	16
1.3. Фізико-хімічні методи очищення біогазу	17
1.4. Методи біологічного очищення біогазу	18
1.5. Підвищення якості біогазу за допомогою мікробних електрохімічних методів	21
1.6. Магнітні та електричні біологічні ефекти	24
1.7. Висновки до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2 ФОРМУВАННЯ ЗАГАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ І КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОГО ВПЛИВУ НА ПРОЦЕСИ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ	30
2.1. Вибір і застосування методу дослідження впливу магнітного поля, що обертається, на інтенсивність метаноутворення в біореакторі	30
2.2. Матеріали і методи досліджень процесів біометаногенезу під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань	35
2.3. Систематизація, адаптація і удосконалення методів для поглиблених досліджень клітин субстрату в процесах анаеробного бродіння з використанням електрофізичних методів впливу	40
2.4. Удосконалення методики використання мікробних електролізних комірок в біореакторах	50
2.5. Висновки до розділу 2	51
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОГО ВПЛИВУ НА ПРОЦЕСИ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ	52
3.1 Результати моделювання системи із зовнішнім електромагнітним осцилятором занурювального електромеханічного перетворювача	52

3.2. Результати експериментальних досліджень інтенсивності виходу біогазу та біометану при впливі обертового магнітного поля	54
3.3. Результати експериментальних досліджень інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей пташиного посліду з речовинами з вмістом лігніну під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань	56
3.4. Висновки до розділу 3	60
<b>РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ЗАНУРЮВАЛЬНОГО ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА</b>	<b>62</b>
4.1 Методи визначення параметрів схеми заміщення асинхронних машин традиційної конструкції	62
4.2 Методи визначення параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів з масивним феромагнітним ротором	67
4.3. Висновки до розділу 4	76
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>78</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПЕМП – поліфункціональний електромеханічний перетворювач

ЕМП – електромагнітне поле

MATLAB & Simulink – інтерактивний інструмент для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем

ШИМ – широтно-імпульсний перетворювач

МЕК – мікробні електролізні комірки

МПЕ – мікробні паливні елементи

ПУЕ – Правила улаштування електроустановок

НПЧ – напівпровідниковий перетворювач частоти

АД – асинхронний двигун

## ВСТУП

Використання біогазу має численні переваги, а також обмеження для навколишнього середовища, суспільства та прямих споживачів енергії [1-10]. Біогазове паливо є універсальним і виробляє менше викидів парникових газів, тоді як його виробництво шляхом анаеробного зброджування може бути застосоване для обробки біорозкладаних відходів шляхом дезінфекції існуючих патогенів.

Споживання біогазу, особливо з невеликих установок, буде економічно доцільним через диверсифікацію сировини та застосування виробленого біогазу. Успішний розвиток біогазової технології вимагає сприяння заходам, таким як привабливі додаткові тарифи, модернізація мереж для забезпечення децентралізованої генерації. Окрім виробництва тепла та електроенергії, в останні роки з'явилися нові способи застосування біогазу. Перетворення біогазу на біометан вже є стратегічною метою в багатьох країнах.

Розвиток біогазових технологій стримує низька їх ефективність і висока енерговитратність забезпечення процесу біометаногенезу. Існуючі способи підвищення енергоефективності таких установок майже вичерпали себе і тому актуальною задачею стає розробка методів інтенсифікації процесу виробництва біогазу іншими засобами і методами, наприклад, стимуляцією мікроорганізмів, що беруть в ньому участь, електричними і магнітними полями.

Відомі результати експериментів, проведених в НУБіП України, з низькочастотним магнітним полем, що обертається, які формують напрямок вдосконалення: виробництва біогазу з високою часткою метану. Напрямом досліджень є формування загальної методики досліджень електрофізичного впливу та уточнення параметрів інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей з речовинами із вмістом лігніну в біогазових реакторах під керованою дією теплового, магнітного і електричного полів та механічних коливань. Необхідним є удосконалення методики визначення параметрів схеми заміщення занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача

проведене з метою підвищення енергоефективності і точності управління процесами електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах.

Зміст поставлених завдань:

- аналіз сучасного стану досліджень по вдосконаленню процесів анаеробного бродіння при виробництві біогазу;
- формування загальної методики, конструктивно-технологічних схем і комплексу методів досліджень електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах;
- проведення моделювання і експериментальних досліджень процесів біометаногенезу сумішей під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів та механічних коливань в біореакторах;
- уточнення параметрів інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей та параметрів схеми заміщення занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача з метою підвищення енергоефективності і точності управління процесами електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах.

**Мета дослідження** – інтенсифікація процесів біометаногенезу в біогазових реакторах шляхом електрофізичного впливу на субстрати та удосконалення проєктних рішень.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні та хіміко-фізичні процеси в біогазових реакторах.

**Предмет дослідження** – процеси біометаногенезу сумішей під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів та механічних коливань в біореакторах . Для досягнення мети та здійснення завдань було використано такі **методи**:

- теоретичні – аналіз, синтез, узагальнення, систематизація, порівняння для розкриття сутності та визначення базових понять досліджуваної проблеми, структурування, моделювання для розробки моделі;
- емпіричні – спостереження, порівняння, вимірювання, розрахунок, метод проб і помилок;

- кількісної обробки даних – визначення середніх значень, розрахунків заданих параметрів.

### **Організація та експериментальна база дослідження.**

Теоретичні дослідження електромагнітних, теплових процесів і характеристик базуються на фундаментальних положеннях теорії електромагнітних пристроїв, теорії коливань, теорії автоматизованого управління, термодинаміки нерівноважних процесів. Для верифікації розрахунків, перевірки теоретичних положень, нових технічних рішень виготовлені та досліджені макетні зразки.

**Практичне значення дослідження:** Розроблені два варіанти конструктивного виконання занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача, що виконує одночасно функції асинхронного приводу, пристрою, що перемішує, індукційного нагрівача і електромагнітного осцилятора. Запропоновані методи досліджень процесів біометаногенезу під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань.

### **Інформація про апробацію результатів роботи та публікації:**

Участь у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей у 2024/2025 навчальному році зі спеціальності «Електричні машини і апарати» з науковою роботою «Удосконалення методу визначення параметрів схеми заміщення поліфункціонального перетворювача з масивним ротором»

Шклярський Я. Д., Заблудський М. М. Підвищення енергоефективності біогазових установок шляхом електрофізичного впливу на субстрат. Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК: тези доповідей 78-ої науково-практичної конференції студентів (м. Київ, 24 квіт. 2025 р.). С. 54.

Участь у виготовленні і дослідженнях експериментального зразка заглибного поліфункціонального електромеханічного перетворювача для біореакторів.

## РОЗДІЛ 1

### **АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ВДОСКОНАЛЕННЮ ПРОЦЕСІВ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БІОГАЗУ**

Використання біогазу має численні переваги, а також обмеження для навколишнього середовища, суспільства та прямих споживачів енергії [1-10]. Біогазове паливо є універсальним і виробляє менше викидів парникових газів, тоді як його виробництво шляхом анаеробного зброджування може бути застосоване для обробки біорозкладаних відходів шляхом дезінфекції існуючих патогенів. Для виробництва електроенергії з використанням біогазу як палива можна використовувати різні технології перетворення та первинні двигуни. Звичайними пристроями та двигунами для виробництва електроенергії з біогазу є двигуни внутрішнього згорання, тобто дизельні та бензинові двигуни, які використовуються як спеціальні газові двигуни, або двопаливні двигуни. Інші газові та парові турбіни всіх розмірів класифікуються як мікро-, малі або великі турбіни, що використовуються як установки відкритого циклу, комбінованого циклу або когенераційні установки. Двигуни Стірлінга — це двигуни внутрішнього згорання, які також доступні для використання у виробництві електроенергії з використанням біогазу як палива. Пряма конверсія може бути досягнута шляхом використання паливних елементів, що працюють на чистому біогазі, або відновлюваному водні, отриманому з біометану або біогазу за допомогою процесів риформінгу. Біогаз також можна використовувати для виробництва відновлюваного палива за допомогою процесу Фішера-Тропша (FT) для використання в транспорті та виробництві електроенергії. Таким чином, біогаз можна використовувати як заміник викопного палива у виробництві електроенергії, транспорті, опаленні та охолодженні, і це важливий шлях переходу до стійкої енергії.

Споживання біогазу, особливо з невеликих установок, буде економічно доцільним через диверсифікацію сировини та застосування виробленого біогазу. Успішний розвиток біогазової технології вимагає сприяння заходам, таким як

привабливі додаткові тарифи, модернізація мереж для забезпечення децентралізованої генерації [1]. Окрім виробництва тепла та електроенергії, в останні роки з'явилися нові способи застосування біогазу. Перетворення біогазу на біометан вже є стратегічною метою в багатьох країнах.

### 1.1. Технологічні особливості виробництва біогазу

Сирий біогаз виробляється із біомаси за допомогою процесу, який називається анаеробним зброджуванням (АЗ). У цьому процесі органічні фракції біовідходів в анаеробних умовах розкладаються на суміш простих молекул, що містить метан (40–65 %), вуглекислий газ (35–55 %), сірководень (0,1–3 %), воду та інші органічні леткі сполуки [5,6]. Цінність енергії з біогазу становить  $37,3 \text{ МДж/м}^3$  з калорійністю від 5000 до  $7500 \text{ ккал/м}^3$ . Процес АЗ складається з чотирьох етапів (рис.1.1).

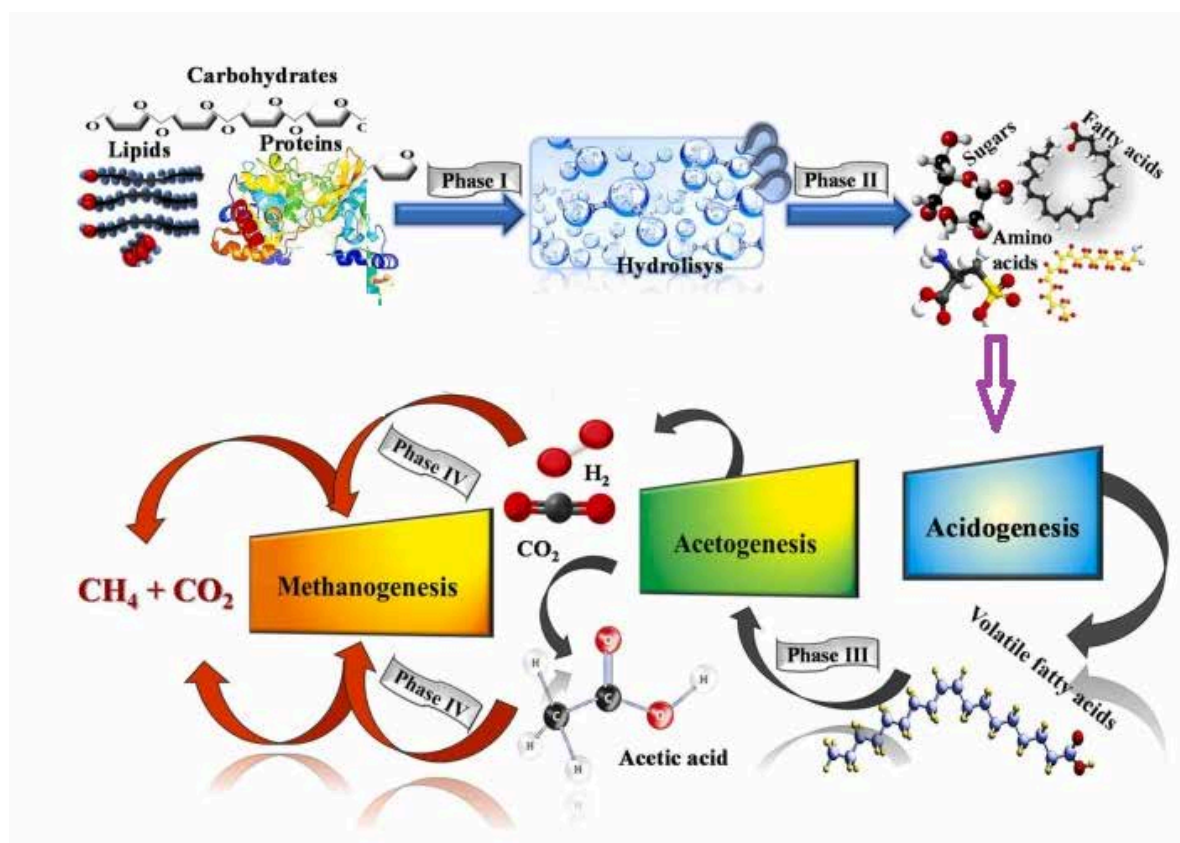


Рис. 1.1. Стадії анаеробного зброджування [5]

Стадії включають гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез, як показано на рис. 1.1 Гідроліз - це перша стадія, на якій високомолекулярні та нерозчинні органічні сполуки, такі як вуглеводи, білки та ліпіди, піддаються перетворенню в низькомолекулярні та прості сполуки, амінокислоти, леткі жирні кислоти (ЛЖК)), цукор. У цьому процесі беруть участь сапрофітні бактерії завдяки участі деяких позаклітинних ферментів. Хімічний процес, який розщеплює молекули води на аніони ( $\text{OH}^-$ ) і катіони ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ), називається гідролізом. Для цього процесу необхідний кислотний каталізатор для розщеплення великих біополімерів на низькомолекулярні субстрати. Ацетат і водень є основними продуктами фази гідролізу, які використовуються на подальших стадіях анаеробного зброджування в процесі метаногенезу. Ацидогенні бактерії (стадія II) перетворюють продукти гідролізу та сполуки, які є розчинними у воді, на такі компоненти, як  $\text{CO}_2$ , метанол або етанол (спирти) та альдегіди.

Під час ацетогенезу (стадія III) перетворення продуктів відбувається за допомогою оцтових бактерій *Syntrophomonas* і *Syntrophobacter*. На цій стадії пропіонат перетворюється на ацетат, глюкоза перетворюється на ацетат, а етанол перетворюється на ацетат, який потім на подальших стадіях використовується метаногенними мікроорганізмами як компоненти субстрату. Під час ацеогенезу з утворенням  $\text{H}_2$ , оцтова кислота та  $\text{CO}_2$  піддаються анаеробному зброджуванню. Ця стадія виконується до моменту, коли метаногени можуть впливати на продукти ацетогенезу, а також на продукти інших процесів АЗ для отримання  $\text{CH}_4$ . Метаногени переважно активні в помірно лужному середовищі (6,8–7,2), оскільки ці мікроорганізми гинуть при  $\text{pH} < 6$ . У різні стадії АЗ  $\text{pH}$  суспензії зазнає змін. На стадії ацидогенезу значення  $\text{pH}$  становить близько 6 і виділяється велика кількість  $\text{CO}_2$ . У діапазоні  $\text{pH}$  6,6–7,5, біодеградація є дуже ефективною, а мікроорганізми дуже оперативними. Загалом АЗ не є швидким процесом, оскільки мікроорганізмам

потрібен майже місяць, щоб адаптуватися до нових умов навколишнього середовища, коли змінюються деякі фактори (тип субстрату, температура чи інші параметри середовища). Мікробні відносини дуже складні, і коли існує відсутність рівноваги між консорціумами мікроорганізмів, які відповідають за різні фази виробництва метану, швидкість реакцій буде уповільнятися, що може призвести до накопичення інгібіторних речовин.

*Основні фактори, що впливають на процес та продукти анаеробної переробки органічних відходів.* Обов'язковою умовою анаеробної ферментації є відсутність кисню. У штучних умовах це можна здійснити лише у герметичних закритих ємностях. Є низка інших чинників, які впливають ефективність ферментації. Швидкість розмноження та обміну речовин у анаеробних мікроорганізмів залежить від температури та тривалості зброджування гною. Теоретично бродіння може настати в інтервалі температур від +0 до +97°C. У цьому процесі беруть участь три групи бактерій, що живуть у наступних інтервалах температур:

- психрофільні бактерії - +20°C ÷ +25°C,
- мезофільні бактерії - +25 C ÷ +40 C,
- термофільні бактерії - +40C ÷ +70°C.

У цих інтервалах температур бактерії виявляють найбільшу життєдіяльність. Якщо температура знижується нижче +15 °C, мікробіологічна активність падає [4]. У психрофільному інтервалі для виробництва біогазу технологічне обладнання практично не застосовується, так як час бродіння тривалий, підігріву матеріалу не потрібно, необхідний великий обсяг бродильних камер. Бродіння у мезофільній температурній зоні частіше застосовується у країнах з помірним кліматом; протягом бродіння 15÷30 днів розкладається 35÷50% органічної речовини. При бродінні у термофільній зоні мікробіологічна активність (за однаковий час) на одиницю маси органічної речовини підвищується; утворення сумарного біогазу на 10÷30% вище, ніж при

бродінні у мезофільній зоні [5]. Органічні речовини розкладаються в анаеробних умовах з різною швидкістю:

- прості вуглеводи, жири, жирні кислоти та білки розкладаються швидко та придатні для утворення метану;

- складні вуглеводи (целюлоза та напівцелюлоза тощо) розкладаються повільно. Для прискорення процесу розкладання матеріали із такими органічними молекулами слід подрібнювати, дробити.

Слід звернути увагу на високий вміст лігніну в рідкому гною ВРХ, який знижує швидкість реакції анаеробних бактерій. Часто це є причиною того, що гній жуйних тварин дає менше газу в порівнянні з екскрементами свиней та птиці, оскільки вони споживають корми з більш високим вмістом сирової клітковини.

При зброджуванні рідкого гною утворення газу в початковий період різко зростає, а потім поступово знижується. При переробці трави, завдяки високому вмісту білка, швидкість розкладання висока і виділяється більше газу, ніж при переробці соломи та коров'ячого гною; вони ферментуються повільніше і вихід біогазу менше.

Ефективність процесу зброджування, технічна досконалість обладнання, що застосовується, характеризуються кількістю біогазу, що виділяється за добу в розрахунку на  $1 \text{ м}^3$  бродильної камери. За літературними даними за добу виділяється при мезофільному режимі  $0,7 \div 1,5 \text{ м}^3$ , при термофільному  $2 \div 3 \text{ м}^3$  біогазу на  $1 \text{ м}^3$  камери зброджування [6].

## 1.2. Необхідність вирішення проблеми підвищення якості біогазу і продуктивності біореакторів

Розвиток біогазових технологій стримує низька їх ефективність і висока енерговитратність забезпечення процесу біометаногенезу. Існуючі способи підвищення енергоефективності таких установок майже вичерпали себе і тому

актуальною задачею стає розробка методів інтенсифікації процесу виробництва біогазу іншими засобами і методами, наприклад, стимуляцією мікроорганізмів, що беруть в ньому участь, електричними і магнітними полями.

Відносний вміст  $\text{CH}_4$  та  $\text{CO}_2$  у біогазі залежить головним чином від природи субстрату та рН реактора.

Окрім цих двох газів, біогаз додатково містить незначну кількість інших сполук, таких як азот у концентраціях 0–3%, який може походити з насиченого повітря, що входить у вхідну воду, пара води у концентраціях 5–10% або вище за термофільних температур, що утворюється в результаті випаровування середовища, кисень у концентраціях 0–1%, який надходить у процес із вхідного субстрату або витоків, сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) у концентраціях 0–10 000 ppmv, який утворюється в результаті відновлення сульфату, що міститься в деяких стічних водах, аміак ( $\text{NH}_3$ ), що утворюється в результаті гідролізу білкових матеріалів або сечі [11]. Окрім  $\text{CH}_4$ , усі інші гази, що містяться в біогазі, є небажаними та вважаються забруднювачами біогазу. Енергетичний вміст метану, що описується нижньою теплотворною здатністю (НТЗ), становить 50,4 МДж/кг-  $\text{CH}_4$  або 36 МДж/м<sup>3</sup>-  $\text{CH}_4$  (за стандартних умов). Зрозуміло, що чим вищий вміст  $\text{CO}_2$  або  $\text{H}_2$ , тим нижча НТЗ біогазу. Для біогазу з вмістом метану в діапазоні 60–65% НТЗ становить приблизно 20–25 МДж/м<sup>3</sup>-біогазу.  $\text{H}_2\text{S}$  та  $\text{NH}_3$  є токсичними та надзвичайно корозійними, пошкоджуючи когенераційну установку (ТЕЦ) та металеві деталі через викиди  $\text{SO}_2$  під час згоряння.

Наразі існують різні методи обробки, спрямовані на видалення небажаних сполук з біогазу, розширюючи спектр його застосування. Перша обробка пов'язана з «очищенням біогазу» та включає видалення шкідливих та/або токсичних сполук, таких як сірководень,  $\text{CO}$  та аміак. Друга обробка називається «модернізацією біогазу» і спрямована на підвищення низької теплотворної здатності біогазу, і таким чином на перетворення його на паливо

вищого стандарту. У випадку, якщо модернізований біогаз очищується до характеристик, подібних до природного газу, кінцевий газовий продукт називається біометаном [12,13].

### 1.3. Фізико-хімічні методи очищення біогазу

Існують розроблені фізико-хімічні методи очищення біогазу [11].

*Метод фізичної абсорбції з використанням системи очищення водою.*

Цей процес базується на відділенні  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{S}$  від біогазу завдяки їх підвищеній розчинності у воді порівняно з  $\text{CH}_4$  (наприклад, розчинність  $\text{CO}_2$  у воді при  $25\text{ }^\circ\text{C}$  приблизно в 26 разів вища порівняно з метаном).

*Метод фізичної абсорбції з використанням органічних розчинників.* Цей метод базується на тому ж принципі, що й очищення водою, проте абсорбція  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{S}$  досягається використанням органічного розчинника замість води. Перевага розчинників порівняно з водою полягає у значно вищій розчинності  $\text{CO}_2$ , але органічні розчинники важко регенерувати і це є основною перешкодою використання цього методу.

*Метод хімічної абсорбції з використанням аміних розчинів.* Однією з переваг цієї технології є те, що  $\text{H}_2\text{S}$  може бути повністю абсорбований в амінному скрубєрі.

*Адсорбція при коливаннях тиску (PSA).* Ця технологія відокремлює різні гази від біогазу на основі їх молекулярних характеристик та спорідненості адсорбенту. Основний принцип технології базується на властивостях газів під тиском притягуватися до твердих поверхонь.

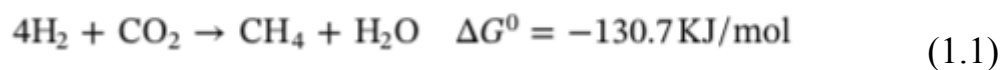
*Мембранне розділення.* Мембранна технологія є конкурентною альтернативою традиційній системі очищення біогазу на основі абсорбції. Основний принцип технології базується на селективних властивостях проникності мембран, що дозволяє розділяти компоненти біогазу.

*Процес криогенного розділення.* Ця технологія здійснюється шляхом поступового зниження температури біогазу, що відділяє зріджений  $\text{CH}_4$  від  $\text{CO}_2$  та решти компонентів з метою отримання продукту, що відповідає стандартам якості для зрідженого природного газу [14].

#### 1.4. Методи біологічного очищення біогазу

Більшість цих методів експериментально перевірені та знаходяться на ранній стадії пілотного або повномасштабного впровадження. Основна перевага таких технологій пов'язана з тим, що  $\text{CO}_2$  перетворюється на інші енергомісткі або високододані продукти за м'яких умов експлуатації (тобто атмосферний тиск, помірні рівні температури), що значною мірою сприяє сталому розвитку циркулярної економіки.

*Хемоавтотрофні методи.* Методи хемоавтотрофного очищення біогазу базуються на дії гідрогенотрофних метаногенів, які можуть використовувати  $\text{H}_2$  для перетворення  $\text{CO}_2$  на  $\text{CH}_4$  за таким рівнянням[11]:



Однак, щоб зробити метод біологічного очищення відновлюваним, водень, необхідний у реакції, повинен походити з відновлюваного джерела, коли використовується залишкова електроенергія від вітрових електростанцій або сонячних панелей. Електроліз води з використанням відновлюваної електроенергії розщеплює воду на  $\text{O}_2$  та  $\text{H}_2$ , однак  $\text{H}_2$  має притаманний недолік дуже низької об'ємної щільності енергії, що ускладнює його зберігання. Крім того, використання  $\text{H}_2$  як палива для транспортного сектору все ще перебуває на стадії розробки. Тому запровадження технології для перетворення  $\text{H}_2$  на  $\text{CH}_4$  є дуже привабливою, оскільки вона поєднує технологію вітрової або

сонячної енергії з технологією біогазу. Цей процес є перспективним засобом перетворення електроенергії на хімічний енергоносіє, який можна легко зберігати в існуючій інфраструктурі природного газу. Енергетичний вміст  $\text{CH}_4$  (36 МДж/м<sup>3</sup>) значно вищий порівняно з відповідним вмістом  $\text{H}_2$  (10,88 МДж/м<sup>3</sup>). Більше того, процес модернізації використовує існуючі потужності біогазових установок і, отже, зменшує початкові інвестиційні витрати. Крім того, під час хемоавтотрофних методів  $\text{CO}_2$  не розділяється або не абсорбується, а перетворюється на  $\text{CH}_4$ , що призводить до значного збільшення кінцевої енергетичної цінності вихідного «вітрогазу» (тобто метану, виробленого з використанням надлишкової енергії вітрових турбін) або «сонячного газу» (тобто метану, виробленого з використанням надлишкової енергії сонячних панелей). Зрештою, ця технологія служить передумовою для сталого розвитку амбітного плану впровадження біогазу, що полягає в розмежуванні виробництва біогазу від доступності біомаси. Конфігурації, в яких відбувається модернізація біогазу за допомогою водню, можна класифікувати на три категорії, а саме: in-situ, ex-situ та гібридні конструкції [12,13].

У концепції in-situ (латинський вираз, що означає на місці)  $\text{H}_2$  впорскується всередину біогазового реактора для зв'язування з ендогенним  $\text{CO}_2$ , що утворюється в анаеробному біореакторі, та перетворення на  $\text{CH}_4$  під дією автохтонних метаногенних архей. Процес може забезпечувати приблизно до 99% вилучення метану лише за умови повного контролю експлуатаційних параметрів (наприклад, рН). Основна технічна проблема, з якою стикається технологія впорскування  $\text{H}_2$  всередину біогазового реактора для зв'язування з ендогенним  $\text{CO}_2$ , пов'язана зі збільшенням рівня рН до значень вище 8,5, що призводить до пригнічення метаногенезу. Щоб полегшити цю технічну проблему, було запропоновано спільне зброджування з кислими відходами для запобігання підвищенню рН. Альтернативним підходом до вирішення цієї

проблеми буде застосування контролю рН, що може забезпечити переробку до майже чистого біометану. *Додатковим ключовим параметром є розчинність  $H_2$  у рідкій фазі, оскільки він повинен перетинати межу розділу між газом та рідкою фазою, щоб бути доступним для мікроорганізмів. Розчинність більшості газів у воді є досить низькою, що обмежує масообмін газ-рідина та перешкоджає роботі біореактора . З цієї причини матеріал та тип модуля, який використовується для введення  $H_2$ , застосування потоків рециркуляції газу та конструкції реактора вважаються фундаментальними елементами для реалізації in situ модернізації біогазу.*

Концепція модернізації біогазу ex-situ базується на забезпеченні  $CO_2$  із зовнішніх джерел та  $H_2$ , в анаеробному реакторі, що містить гідрогенотрофну культуру, що призводить до їх подальшого перетворення на  $CH_4$ . Цей метод має кілька переваг порівняно з процесом in-situ: а) він забезпечує стабільність традиційного процесу виробництва біогазу, оскільки модернізація відбувається в окремому блоку; б) біохімічний процес простіший, оскільки не відбувається деградації органічного субстрату (тобто початкові етапи анаеробного розщеплення, такі як гідроліз та ацидогенез, не виконуються), с) це процес, незалежний від біомаси, d) можна використовувати інше зовнішнє джерело відходів  $CO_2$  (наприклад, синтез-газ), що робить процес більш гнучким,

Існує іще один метод – фотосинтетичне покращення біогазу. У процесі модернізації біогаз впорскується або безпосередньо у фотобіореактори, або зовні в абсорбційну колону, де потік мікродоростевого бульйону рециркулює з основного резервуара. Згодом фотоавтотрофні мікроорганізми, такі як прокаріотичні ціанобактерії або еукаріотичні мікродорості, можуть ефективно поглинати  $CO_2$ , використовуючи сонячне випромінювання, воду та поживні речовини для виробництва біомаси, кисню та тепла.

### 1.5. Підвищення якості біогазу за допомогою мікробних електрохімічних методів

Поточна система очищення муніципальних стічних вод становить приблизно 3% світового споживання електроенергії та 5% викидів парникових газів, крім вуглекислого газу. Однак, враховуючи, що вміст енергії у стічних водах у 2-4 рази перевищує енергію, що використовується для очищення, майбутні комунальні підприємства можуть стати енергопозитивними, якщо будуть впроваджені нові технології для відновлення енергії. Крім того, ці споруди також відновлюватимуть інші ресурси з доданою вартістю, такі як поживні речовини, метали, хімікати та чиста вода, і таким чином стануть біопереробними заводами замкнутого циклу з максимальною продуктивністю та ефективністю. Мікробні електролізні комірки (МЕК) — це мікробна біоелектрохімічна технологія, що опосередковується електрикою, яка спочатку була розроблена для високоефективного виробництва біологічного водню з потоків відходів [15]. Зараз МЕК стають універсальною технологією та пропонують нове рішення для нових екологічних проблем, пов'язаних з переробкою потоків відходів та відновленням енергії та ресурсів. Окрім виробництва водню, МЕК також можуть підтримувати кілька енергетично несприятливих біологічних/хімічних реакцій.

Зовнішнє електропостачання є рушійною силою МЕК для різних застосувань. Незважаючи на те, що рівень напруги, необхідний для МЕК, набагато нижчий, ніж рівень напруги для процесу електролізу води (1,8–2,0 В), споживання енергії все одно високе, особливо для тривалої роботи в сільській місцевості чи віддаленій місцевості, де важко дістатися до електромережі. Отже, зниження вартості електроенергії або розвиток альтернативних відновлюваних джерел енергії має суттєве значення. На рис.1.2. представлена платформа біоелектрохімічних застосувань мікробних електролізних комірок. Водень, що утворюється в катоді, може бути використаний для покращення біогазу. Фактично метан може бути безпосередньо отриманий шляхом

відновлення  $\text{CO}_2$  в катоді за допомогою біокатода в МЕК із загальною енергоефективністю не нижче 80%. Відновлення  $\text{CO}_2$  до метану пояснюється як позаклітинним переносом електронів, так і абіотично утвореним воднем (електроліз води), що залежало від встановленого потенціалу катода.

Виявлено, що видалення  $\text{CO}_2$  методом покращення біогазу in-situ є більш ефективним, ніж методом ex-situ як у періодичних, так і в безперервних експериментах. Видалення  $\text{CO}_2$  пояснюється не лише виробництвом метану, але й іонізацією  $\text{CO}_2$  через лужність, що утворюється на катоді.

МЕК може бути оснащена протонно-обмінною мембраною та аніонообмінною мембраною для видалення  $\text{CO}_2$  з біогазу. При цьому досягається вища ефективність видалення  $\text{CO}_2$  та швидкість виробництва метану, але цей процес потребує більше енергії на одиницю видаленого  $\text{CO}_2$  (2,36 проти 0,78 кВт·год/нм<sup>3</sup> видаленого  $\text{CO}_2$ ). Слід зазначити, що органічні стічні води не є необхідними для анода, оскільки електрика може забезпечити електрони з води для відновлення  $\text{CO}_2$  на катоді. Електрика може бути отримана з різних віднолювальних джерел, як показано на рис.1.2.



Рис. 1.2. МЕК як платформа біоелектрохімічних застосувань

Виробництво цінних рідких продуктів з  $CO_2$  також може бути досягнуто в МЕК: відновлення  $CO_2$  до мурашиної кислоти за допомогою багатостінних вуглецевих нанотрубок як катода; виробництво ацетату. Отже, мікробний електрохімічний метод є екологічно безпечним способом поєднання кількох позитивних дій, включаючи споживання  $CO_2$  для покращення біогазу та виробництва цінних газових та рідких продуктів. Однак більшість поточних досліджень базуються на лабораторних експериментах; технічні та економічні обмеження для масштабування технологій покращення біогазу залишаються невивченими.

Стимули для покращення біогазу пов'язані з масштабнішим переходом енергетичних систем на відновлювані джерела енергії, який зараз здійснюють багато країн. При звільненні від енергопостачання з викопного палива, характер енергетичної системи змінюється в бік високої частки коливальної енергії від

вітрової та сонячної енергії та високої залежності від ресурсів біомаси [16]. Що стосується ролі біогазу в енергетичній системі, це створює економічні та екологічні стимули для модернізації біогазу. У короткостроковій перспективі модернізація шляхом фізичного/хімічного видалення  $CO_2$  є як економічно, так і екологічно привабливою, в деяких країнах це вже відбувається.

Удосконалення біогазу шляхом фізико-хімічного видалення  $CO_2$  швидко розвивається в багатьох країнах і це головним чином пов'язано з економічною вигідністю порівняно з виробництвом електроенергії та/або тепла безпосередньо з необробленого біогазу. Відносна вигода від удосконалення біогазу порівняно з виробництвом тепла/електроенергії з необробленого біогазу зростає, оскільки виробництво тепла/електроенергії має працювати безперервно, а необроблений біогаз не може економічно ефективно зберігатися більше кількох годин, тоді як удосконалений газ може зберігатися в газовій мережі місяцями. Зберігання газу забезпечує гнучкість та додаткову цінність його використання в періоди найвищої вартості.

Протягом останнього десятиліття спостерігалось швидке зниження собівартості виробництва відновлюваної електроенергії, як сонячної, так і вітрової, і очікується, що воно продовжиться. Таким чином, гідрування біогазу може виявитися ключем до сталої системи відновлюваної енергетики завдяки своїй здатності звільнити енергетичні системи від надмірної залежності від постачання біомаси.

Фізико-хімічні методи загалом знаходяться на високому рівні технологічної готовності, тоді як біологічні методи все ще є новими та ще не комерційними. Оскільки біометан, отриманий після переробки біогазу, залишається дорогим, існує потреба в розробці більш ефективних і дешевих процесів шляхом постійних досліджень і розробок.

## 1.6. Магнітні та електричні біологічні ефекти

Магнітні поля у екологічній інженерії застосовуються для вдосконалення систем або технологій очищення стічних вод [17]. Застосування магнітного поля головним чином покращує біологічні характеристики за рахунок покращення активності бактерій і поступово сформувалося визначення магнітного біологічного ефекту [18-20]. Різні типи та інтенсивності магнітного поля, час дії та біологічні клітинні структури викликають різні біологічні ефекти, які можуть сприяти або пригнічувати діяльність клітин. Магнітне поле по-різному впливає на механізм транспорту клітинної стінки грампозитивних і грамнегативних бактерій [21]. В даний час застосування магнітної технології в основному включає постійні магніти, високоградієнтну магнітну сепарацію, магнітну адсорбцію або електромагнітні пристрої. Різні способи застосування магніту по-різному впливають на продуктивність кожної системи, наприклад, очищення стічних вод. Експерименти з магнітним полем постійного струму (DC), імпульсного постійного струму та змінного струму (AC) показали, що магнітне поле змінного струму позитивно впливає на ефективність очищення стічних вод. Застосування магнітного поля також збільшило швидкість росту мікроорганізму при рівнях магнітної індукції до 17,8 мТл, а потім спостерігалось зменшення росту. Попередні експерименти та дослідження зовнішнього магнітного поля різної інтенсивності (70–150 мТл) підтвердили, що 70 мТл має найбільш очевидне покращення ефективності очищення стічних вод і має значний вплив на мікробну спільноту активного мулу [17]. Проте вплив магнітного поля на функціональний ген мікроорганізму та метаболізм активного мулу залишається рідкістю в оглядах літератури. Дослідження показали, що за умови впливу магнітного поля з індукцією 5 мТл може посилити активність деякої спільноти бактерій і зменшити різноманітність бактерій. Порівняно з відсутністю зовнішнього магнітного поля та сильним зовнішнім магнітним полем, експресія функціональних генів, пов'язаних з трансдукцією мікробного сигналу, життєздатністю клітин і трансдукцією сигналу в

середовищі 5 мТл була заєстрована вищою. Насправді структурна стабільність і різноманітність цих мікробних спільнот тісно пов'язані з ефектом біологічної обробки. Тому для повного розкриття механізму впливу магнітного поля на покращення ефективності необхідно глибоко вивчити структуру та функціонування мікробного співтовариства в активному мулі.

Відомі результати дослідження посилення процесу біологічної очистки за допомогою електромагнітного поля (ЕМП) [22]. Було ретельно досліджено вплив ЕМП протягом 24 годин на концентрацію біомаси, швидкість осідання, індекс об'єму осаду та видалення забруднюючих речовин. Результати показали значне покращення фізичних властивостей активного мулу під впливом ЕМП, що призвело до високого накопичення концентрації біомаси.

Досліджено вплив факторів магнітного впливу, таких як статичне магнітне поле, магнітні наночастинки та звичайні магнітні частинки, на анаеробне зброджування муніципального зневодненого мулу. У поєднанні з бактеріями магнітні наночастки можуть ефективно збільшувати вихід газу, вміст метану та скорочувати період анаеробного зброджування [23]. Відомі дослідження впливу постійного магнітного поля (ПМП) на ефективність анаеробного зброджування біомаси водоростей [24]. Проведено експерименти щодо впливу добавок на ряд співвідношень гній/солома та вироблення біогазу при мезофільному режимі. Результати показали, що максимальний приріст продукції метану відзначено при додаванні 3 г магнетиту [25]. Вплив наночастинок заліза (Fe) та оксиду заліза ( $Fe_3O_4$ ) з різною концентрацією на виробництво біогазу та метану досліджували з використанням спеціально розробленої періодичної анаеробної системи. Встановлено, що наночастки посилюють анаеробний процес і прискорюють зброджування гноївки [26].

Стічні води виробництва молочних продуктів характеризуються високою концентрацією органічних сполук і зазвичай використовуються виробництва енергії. Методи збільшення виробництва біогазу включають застосування намагнічувальних пристроїв на варильному казані для створення статичного

магнітного поля [27]. Наукова література включає дослідження, які сильно різняться на кшталт електромагнітного поля, інтенсивності, тривалість впливу, довгострокові/короткострокові ефекти та аналізовані біологічні мішені (клітини, тканини, органи та організм). Проте дослідження, що вивчають вплив поля на мікроорганізми, дуже обмежені. У статті [28] виконано критичний аналіз доступної наукової літератури про вплив полів на мікроорганізми та про контрасти встановлених біологічних ефектів. Електрохімічні реакції, наприклад гідроліз води, може збільшити доступність водню відповідно на користь анаеробних процесів біодеградації. Вплив слабого електричного поля на ріст і метаболічну поведінку ентеробактерій, що розчиняються, досліджували з використанням глюкози в якості єдиного джерела вуглецю [28]. Незважаючи на відносну простоту структури бактерій як моделей для вивчення фундаментальних метаболічних реакцій на магнітні поля, дані, представлені в літературі, часто суперечливі, а механізми дії не зрозумілі [29]. Іони магнію, кальцію, цинку бере участь у ферментативних процесах, при цьому магнітні поля модифікують взаємодію цих іонів з внутрішньоклітинними ферментами [30]. Вплив різних магнітних полів на активність анаеробного мулу вивчався в лабораторних реакторах, що містять два переважні штами – *Bacillus* sp. та *Brevibacillus* sp. Результати показали, що магнітне неоднорідне поле 0-4 мТл найбільш ефективно покращило активність даного мулу, при цьому пікова швидкість утворення метану збільшилася на 20,6% [31].

Підтверджена доцільність застосування постійного електромагнітного магнітного поля як біостимулюючого агент проведена в анаеробних реакторах з глюкозою (2 г/л) при температурі  $37 \pm 2$  °C [32]. Діапазон позитивного впливу постійного магнітного поля, представлений у розглянутих дослідженнях аеробної обробки, становив від 7 до 490 мТл. Дослідження показали, що попередня обробка кукурудзяного силосу імпульсним електричним полем підвищувала біогазовий потенціал [33]. Деякі види біомаси вимагають великих витрат, щоб гарантувати високу швидкість перетворення метану. Складна структура лігноцелюлози перешкоджає проникненню в неї целюлозолітичних

ферментів, в результаті необхідно більш тривалий час утримання для збільшення доступності поживних речовин [34].

Вплив електромагнітних полів має тенденцію посилювати, але не знижувати клітинну активність. Мембрани, що піддаються впливу електричного поля, заряджаються так само, як конденсатор, і це індукує потенційну трансмембранну енергію. Однак, якщо різниця потенціалів перевищує 1В, це спричиняє клітинну загибель. Бактеріальна смертність зростає пропорційно інтенсивності прикладеного поля та загальної тривалості впливу [28]. У більшості відомих досліджень напруженість електричної складової змінного електромагнітного поля не реєструвалася, однак є експериментально встановлений рівень максимально допустимої напруженості постійного електричного поля 200 В/м [35].

Відома робота по стимуляції метаногенів в електричних полях для частот у діапазоні 0,1-500 Гц [36]. Ця робота спрямована на те, щоб вказати, що діелектричні властивості органічних матеріалів, які будуть використовуватися для виробництва біогазу, можуть дати цінні вказівки, пов'язані з біохімічними процесами в анаеробних варильних котлах. Експериментальні результати показують, що завдяки оцінці деяких типових параметрів, таких як електрична проникність, електрична ємність та коефіцієнт діелектричних втрат у лабораторних експериментах, ми можемо покращити активність метаногенів та, отже, якість біогазу, а також ефективність біогазових установок у промисловому застосуванні

Відомі результати експериментів, проведених в НУБіП України, з низькочастотним магнітним полем, що обертається, які формують напрямок вдосконалення: виробництва біогазу з високою часткою метану [37,38].

Поданий огляд показав, що в основному досліджувався вплив фізичних полів на деякі штами і лише небагато досліджень було зосереджено на застосуванні електромагнітного поля до біосистеми, наприклад, у біореакторах періодичної дії з робочим об'ємом більше 5л. У більшості досліджень напруженість електричної складової змінного електромагнітного поля та

тривалість дії не реєструвалися. Системний підхід, фізична та біохімічна аргументація оптимальності з погляду енергоефективності відсутні у більшості проведених досліджень.

### 1.7. Висновки до розділу 1

Розвиток біогазових технологій стримує низька їх ефективність і висока енерговитратність забезпечення процесу біометаногенезу. Існуючі способи підвищення енергоефективності таких установок майже вичерпали себе і тому актуальною задачею стає розробка методів інтенсифікації процесу виробництва біогазу іншими засобами і методами, наприклад, стимуляцією мікроорганізмів, що беруть в ньому участь, електричними і магнітними полями.

Метою роботи є вдосконалення процесів анаеробного бродіння з використанням електрофізичних методів впливу. Для досягнення мети вирішувались такі задачі:

- аналіз сучасного стану досліджень по вдосконаленню процесів анаеробного бродіння при виробництві біогазу;
- формування загальної методики, конструктивно-технологічних схем і комплексу методів досліджень електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах;
- проведення моделювання і експериментальних досліджень процесів біометаногенезу сумішей під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів та механічних коливань в біореакторах;
- уточнення параметрів інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей та параметрів схеми заміщення занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача з метою підвищення енергоефективності і точності управління процесами електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах.



## РОЗДІЛ 2

### ФОРМУВАННЯ ЗАГАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ І КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОГО ВПЛИВУ НА ПРОЦЕСИ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ

Напрямом досліджень є формування загальної методики досліджень електрофізичного впливу та уточнення параметрів інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей з речовинами із вмістом лігніну в біогазових реакторах під керованою дією теплового, магнітного і електричного полів та механічних коливань.

2.1. Вибір і застосування методу дослідження впливу магнітного поля, що обертається, на інтенсивність метаноутворення в біореакторі

Розглядаються два можливі варіанти (рис.2.1) конструктивного виконання занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП), що виконує одночасно функції асинхронного приводу, пристрою, що перемішує, індукційного нагрівача і електромагнітного осцилятора.

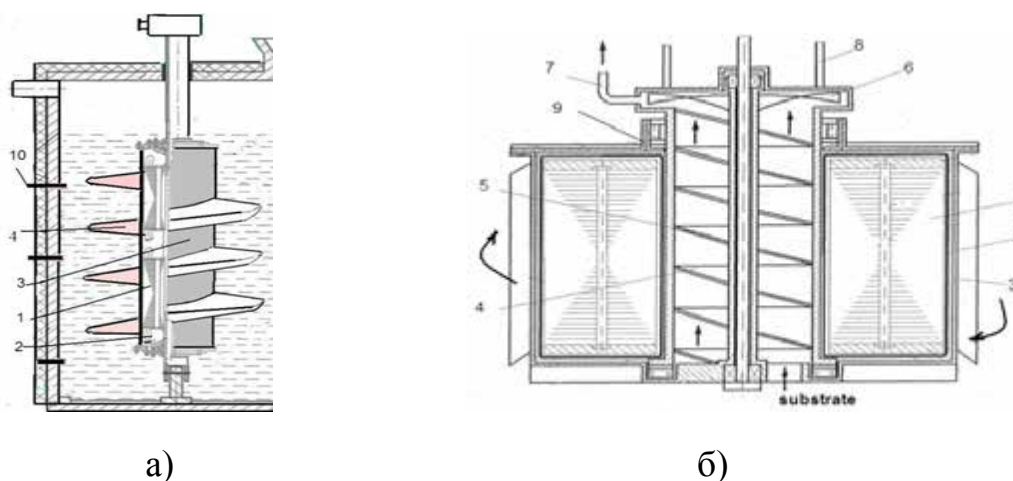


Рис.2.1. Конструктивні виконання занурювального електромеханічного перетворювача: а) система із зовнішнім електромагнітним осцилятором; б) система із зовнішнім та внутрішнім електромагнітним осцилятором

За допомогою ПЕМП субстрат зміщується та рівномірно прогрівається. Від джерела змінного струму живлення на статори 1 з трифазною обмоткою 2 подається напруга відповідної амплітуди і частоти. Змінні магнітні поля статорів, що обертаються, збуджують вихрові струми в підлогою феромагнітному роторі 3, здійснюючи нагрівання останнього, при цьому також здійснюється запасання тепла в теплоакумуючій магнітній рідині, що заповнює порожнисті лопаті 4 і внутрішні порожнини ПЕМП. Одночасно від взаємодії обертального магнітного поля і вихрових струмів створюється електромагнітний момент, що приводить у обертання порожнистий феромагнітний ротор 3 і шнекову мішалку 4. Система із зовнішнім і внутрішнім електромагнітним осцилятором забезпечує не тільки перемішування субстрату, але і його циркуляцію через внутрішню порожнину відцентрового насоса 6 і напірних патрубків 7. Обидві системи додатково містять вантажонесучі елементи 8, магнітні ущільнення 9 і 10 датчики контролю параметрів субстрату. Один зі статорів створює  $2p_d$  – полюсне поле з магнітним потоком  $\Phi_d$  і частотою  $f_1$ , яке обертається. Частота струмів зони ротора, що відповідає активній довжині статора, становить  $f_{2d} = f_1 s_d$ , де  $s_d$  – ковзання ротора. При підключенні трифазної напруги до обмотки іншого статора утворюється  $2p_r$  - полюсне поле  $\Phi_r$ , яке наводить на відповідній ділянці порожнистого феромагнітного ротора ЕРС з частотою [39]:

$$f_2 = \left[ \frac{p_r}{p_d} (1 - s_d) \pm 1 \right] \quad (2.1)$$

Знак «+» відповідає зустрічному, а «-» – узгодженому обертанню полів  $\Phi_d$  та  $\Phi_r$ . Від частоти вихрових струмів на відповідних ділянках порожнистого феромагнітного ротора залежить глибина проникнення та енергія електромагнітного поля. Таким чином, стає можливим регулювання швидкості, інтенсивності тепловиділень, а також здійснення реверсивного режиму обертання порожнистого феромагнітного ротора і, відповідно, шнекової мішалки для створення сприятливих умов анаеробного процесу як в

мезофільному, так і в термофільному режимах і збільшення доступної для ферментів питомої площі при механічній активації. На зовнішній поверхні порожнистого феромагнітного циліндра діє низькочастотне магнітне поле, амплітуда якого може регулюватися в межах від 25 до 50 мТл, а частота - від 8 до 55 Гц, шляхом подавання на статори квазічастотної напруги від частотного регулятора. Процеси анаеробного бродіння органічної сировини, що відбуваються в результаті життєдіяльності бактерій, припускають низькі швидкості руху рідини в резервуарі, а циркуляція струменя повинна залишатися ламінарною при числі  $Re < 30$ . Сучасний рівень розвитку біогазового виробництва дозволяє переробляти субстрати із вмістом сухої речовини до 12 %, якщо розмір волокнистих чи стеблових елементів не перевищує 30 мм. Тому реальна частота осцилюючого магнітного поля в субстраті матиме відповідну поправку на ковзання субстрату щодо обертового магнітного поля статора.

*Одним з етапів дослідження є моделювання системи із зовнішнім електромагнітним осцилятором занурювального електромеханічного перетворювача (рис.2.1, а) у програмному комплексі Comsol Multyphysics .*

Основою для чисельного розрахунку тривимірного квазістаціонарного електромагнітного поля ПЕМП є диференціальне рівняння з частинними похідними, зведене до системи алгебраїчних рівнянь для шуканих значень векторного магнітного потенціалу у вузлах сітки скінченних елементів [40]

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}\right) - j\omega_1 s \gamma \vec{A} = -\vec{J}_{ext}. \quad (2.2)$$

Вихідними даними для розрахунку електромагнітної задачі є: геометричні параметри моделі; кутова частота обертання ротора; густина струму в пазах статора; електричні та магнітні властивості матеріалів.

За результатами розрахунку векторного розподілу магнітного потенціалу розраховуються значення магнітної індукції, напруженості магнітного та електричного полів. Розрахунок струмів, втрат та сил здійснюється шляхом інтегрування за об'ємами та поверхнями розрахункових областей моделі.

У магнітному полі індукція  $B$  діє на заряди у воді, так само як і в електричному полі  $E$ . Різниця полягає лише в напрямку дії цих сил. Тому через поляризацію води сила Лоренца також повинна зменшуватися в  $\epsilon$  разів. Тобто, для сили Лоренца, яка визначає вплив на заряди в потоках перемішування субстрату зі швидкістю  $v$ , формулу слід записати у вигляді

$$\vec{F}_L = \frac{q}{\epsilon} [\vec{v} \cdot \vec{B}] \quad (2.3)$$

Мікробні колонії анізотропні, тому їхня гідратація також анізотропна. Клітини мають негативний заряд, тому взаємодіють з молекулами води, утворюючи водневі зв'язки.

*Другим етапом дослідження впливу обертового магнітного поля на субстрати є експериментальні роботи на лабораторній установці. Для виділення ролі кожного з можливих факторів, що впливають на інтенсивність анаеробного бродіння спочатку експерименти проведені для комплексу, що складається з двох основних впливів: обертове (кругове або еліптичне) магнітне поле і механічне перемішування. Органічний субстрат у біогазовій установці є полідисперсним середовищем, що містить 89% води та інше – тверді частинки різних розмірів та щільності, які містяться у гною свиней. Вихідний питомий електричний опір субстрату, виміряний мостом змінного струму P577, склав 0,836 Ом·м, що на порядок нижче питомого електричного опору водопровідної води (11,88 Ом·м). Лабораторна установка для досліджень впливу обертового магнітного поля на субстрат показана на рис.2.2. Геометричні розміри комірки, де розташовані статор і ємність з субстратом, додатково наведені на рис. 2.3.*

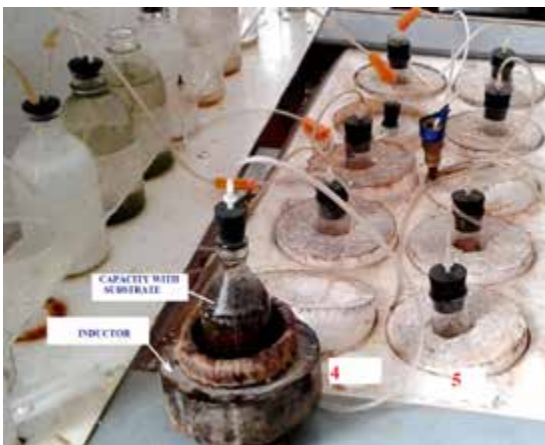
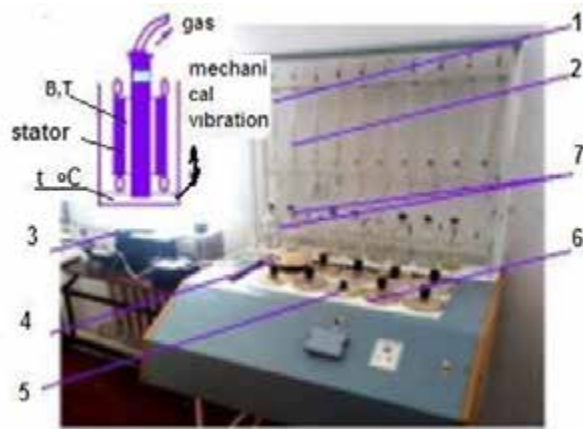


Рис.2.2. Лабораторна установка для досліджень впливу обертового магнітного поля на субстрати: 1, 2 – відповідно вимірювальна трубка виходу біометану з біореактора з впливом електромагнітного поля і без впливу; 3 – тесламетр; 4 –статор з субстратом; 5 –контрольний зразок субстрата; 6 – рухома платформа для переміщення та підігрівання субстрату; 7 – ємність з вапняною водою.

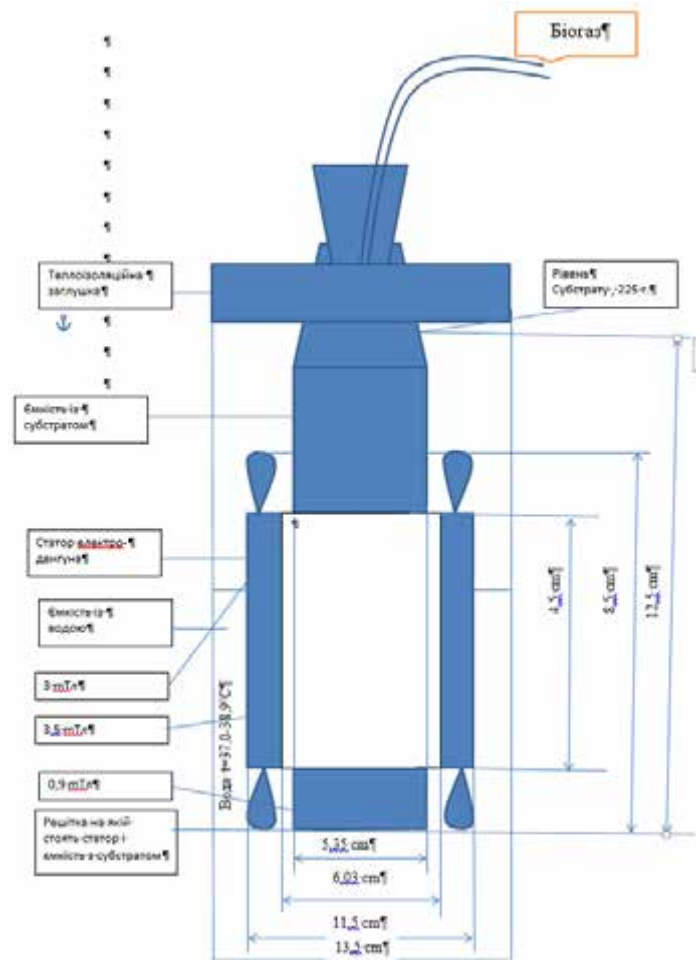


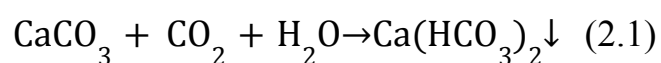
Рис.2.2. Комірка, де розташовані статор і ємність з субстратом

Процес перемішування забезпечується дією вібраційних коливань на рухому платформу за допомогою ексцентрика, в якій розташовані досліджувані комірки. Підтримування температурного режиму здійснюється за допомогою електронагрівника, що нагріває воду в комірках, де розміщені ємності з субстратом. При цьому на зовнішній поверхні ємності створювалося низькочастотне магнітне поле, що обертається з індукцією на рівні 3 - 3,5 мТл, величина якого контролювалася портативним універсальним тесламетром. В обох ємностях постійно підтримувався мезофільний режим бродіння ( $t=37-39^{\circ}\text{C}$ ). Послідовність проведення експерименту така:

- 1) Записували значення рівня води у вимірювальних трубках 1, 2.
- 2) Вмикали перемішування (час перемішування 2 хв.) і подавали напругу на статор електродвигуна, створюючи електромагнітне поле навколо ємності з субстратом ( час впливу поля – 15 хв.).

3) Через годину з вимірювальних трубок 1, 2 знімали дані виходу біогазу по об'єму витісненої біогазом води.

Вплив низькочастотного магнітного поля та механічне перемішування виконувалося щодня з інтервалом 8 год. Експерименти проводились на протязі 24 днів. Друга серія експериментів була проведена з метою визначення впливу обертового магнітного поля на інтенсивність виходу саме біометану, тобто його частки у загальному виході біогазу. Вихід з біореакторів передувались до ємкостей, які заповнені вапняною водою (450 мл), через яку пропускають утворений біогаз для забирання вуглекислого газу:



Результати досліджень наведені у розділі 3.

2.2. Матеріали і методи досліджень процесів біометаногенезу під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань

Установка для дослідження складається з 5-ти окремих систем реактор (R) –евдіометр, обладнаних системою контрольованого обігріву (thermostat) , перемішування, відведення, накопичення та вимірювання обсягу біогазу (рис.2.3). Окремий біореактор утворено з муфти ПВХ діаметром 250 мм, з обох кінців якої, з використанням гумового ущільнювача, вмонтовано заглушки з ПВХ. Таким чином утворено герметичний резервуар. загальний об'єм якого складає 12 л, робочий об'єм – до 9 л, висота резервуару – 250 мм. Теплове поле чотирьох біореакторів створено за рахунок саморегульованого нагрівального електричного кабелю потужністю 30 Вт/п.м. Кабель влаштовано по зовнішній поверхні резервуару у вигляді спіралі. Загальна довжина кабелю на один реактор складає 10 п.м. Таким чином теплове поле впливу крізь стінку

резервуару складає 300 Вт. Робота електричного нагрівального кабелю регулюється від терморегулятора з приєднаним датчиком температури. Гістерезис терморегулятора дозволяє контролювати температуру в межах  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Температурний режим п'ятого біореакторів забезпечувався розміщенням його в ємності з теплоносієм (вода). Нагрів та контроль температури води в ємності, де знаходиться біореактор, організований за допомогою обігрівача, також обладнаного терморегулятором.

При виділенні біогазу за рахунок підвищення тиску газу в герметичній системі біореактор-евдіометр, рухома частина евдіометра піднімається на висоту, що відповідає певному значенню обсягу газу на градуйованій шкалі. Фіксація обсягу виділеного біогазу здійснювалася дискретно, шляхом візуального зчитування з градуйованою шкали евдіометра. Виміряний обсяг біогазу приводився до нормальних умов (273,15 К; 101,3 кПа). Вміст  $\text{CH}_4$  в біогазі визначався за допомогою портативного цифрового газоаналізатора типу Landtec GEM-500. Перемішування в реакторах забезпечується з допомогою мотор-редукторів, що обертають вісь лопатевої двоярусної мішалки. Для мінімізації стресу мікроорганізмів застосована швидкість обертання  $n = 36$  об/хв.

Для дослідження процесу метанового бродіння зразків органічних матеріалів у роботі застосовано метод періодичного зброджування при температурі  $36 \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Ініціацію процесу метанового бродіння здійснено шляхом повного змішування порції зразку органічного матеріалу з інокулятом (суспензія, що містить стартову популяцію життєздатних метан-утворюючих бактерій). Для аналізу відтворюваності результатів досліджень суміші готувались та зброджувались в 3-х повторах. Відведення та накопичення виділеного біогазу забезпечено шляхом утворення герметичної системи біореактор-евдіометр. Для уникнення похибки при оцінюванні складу біогазу через можливу абсорбцію газів в водяному затворі евдіометра, останній виконано у виді 5% водного розчину NaCl. Фіксація об'єму виділеного біогазу

здійснюється візуально, шляхом зчитування з градуйованої шкали рухомої частини евідіометра.



Рис.2.3. Експериментальна установка для досліджень процесів біометаногенезу під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань

Сформовано 5 окремих дослідних біореакторів, що характеризуються наявністю фізичного впливу на субстрат відповідно до табл.2.1.

Таблиця 2.1

### Загальна характеристика дослідних систем

Характеристика	№ біореактора				
	R1	R2	R3	R4	R5
Система обігріву (теплового впливу)	Нагрівальний електричний кабель	Нагрівальний електричний кабель	Нагрівальний електричний кабель	Нагрівальний електричний кабель	Ємність з теплоносієм (вода)
Вплив електричного поля	так	так	так	так	ні
Вплив магнітного поля	так	ні	ні	так	Так (магніти зовні стінки реактора)
Вплив механічних коливань (перемішування)	3 рази на добу тривалістю по 15 хв	Ні Мішалка не вкючалась	Ні Мішалка не вкючалась	Постійно	1 раз на добу тривалістю 15 хв

На протязі усього періоду метанового бродіння система саморегульованого нагрівального електричного кабелю біореакторів R1- R4 поперемінно працювала в режимі включення-виключення, при цьому тривалість періоду нагріву і паузи була однаковою і складала у середньому 45 хв. В період нагріву нагрівальний кабель одночасно був джерелом випромінювання низькочастотного (50Гц) електромагнітного поля. За допомогою приладу MULTI-FIELD EMF METER TM-190, TENMARS ELECTRONICS CO.,LTD експериментально заєєстровані такі параметри поля: напруженість електричного поля на поверхні внутрішньої стінки біореактора 946-1020 В /м, всередині по вісі корпусу біореактора- 530 В/м; магнітна індукція мала незначний рівень, відповідно біля стінки -1,94  $\mu\text{T}$ , всередині біореактора- 0,75  $\mu\text{T}$ . При цьому природній фон має такі показники: магнітна індукція – 0,4 мкТ; напруженість електричного поля – 12 В/м.

Магнітне поле в реакторах R1, R4 створюється за допомогою неодимових магнітів, розміщених всередині резервуару і закріплених на кінцях лопаток. Магнітне поле в реакторі R5 створюється за допомогою неодимових магнітів, розміщених зовні на стінках резервуару. Відтак загальна кількість магнітів на кожен з реакторів R1, R4, R5 складає 8 одиниць. Схема розташування основних вузлів біореактора і Закріплення постійних магнітів на перемішувальному вузлі показані відповідно на рис. 2.4, рис. 2.5.

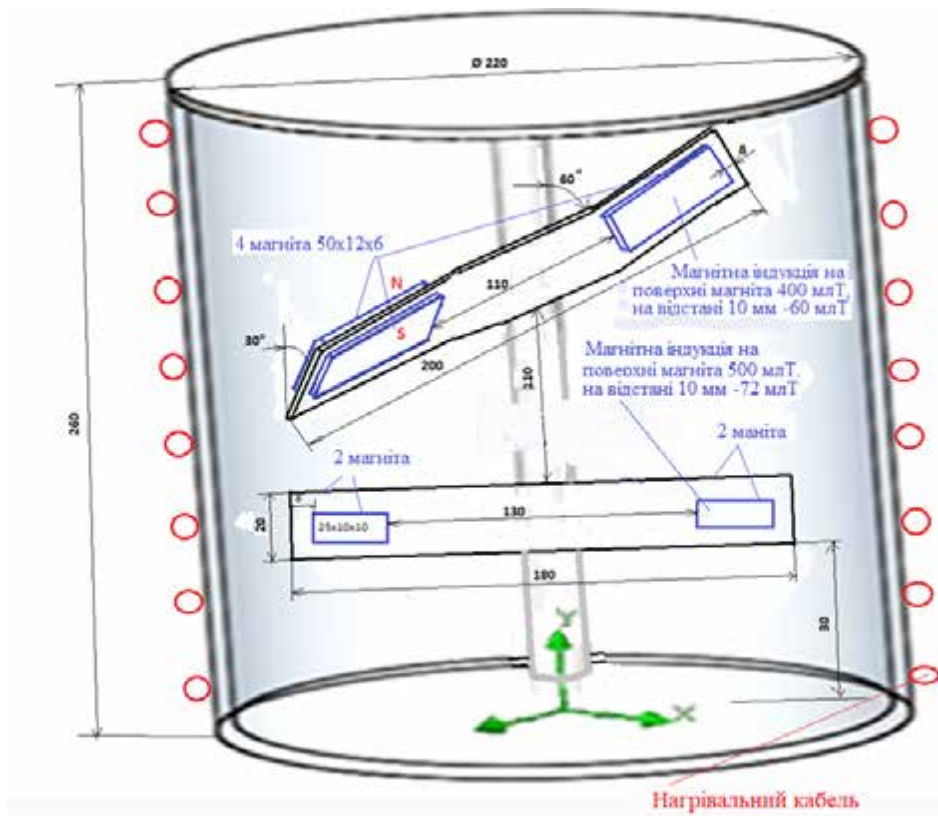


Рис.2.4. Схема розташування основних вузлів біореактора



Рис.2.5. Закріплення постійних магнітів на перемішувальному вузлі

В даному дослідженні сформовано один тип суміші для всіх 5-ти реакторів, що складається з інокуляту, посліду курячого та гранули соломи

пшениці. Частки СОР складають 50% та 50%, відповідно ПК та ПСП. Початкова концентрація СОР в реакторах склала 48,8 гСОР/кг.

2.3. Систематизація, адаптація і удосконалення методів для поглиблених досліджень клітин субстрату в процесах анаеробного бродіння з використанням електрофізичних методів впливу

2.3.1. Удосконалення методики поділу клітин субстрату за їх магнітною сприйнятливістю та функціоналізації магнітних наночастинок

Високоградієнтне магнітне розділення використовується в біотехнологічній галузі і біомедичних застосуваннях, як для діагностичних, так і для терапевтичних цілей [41]. Для досліджень процесу поділу клітин субстрату за їх магнітною сприйнятливістю та функціоналізації магнітних наночастинок пропонується використовувати експериментальну установку, конструктивну схему якої представлено на рис.2.6.

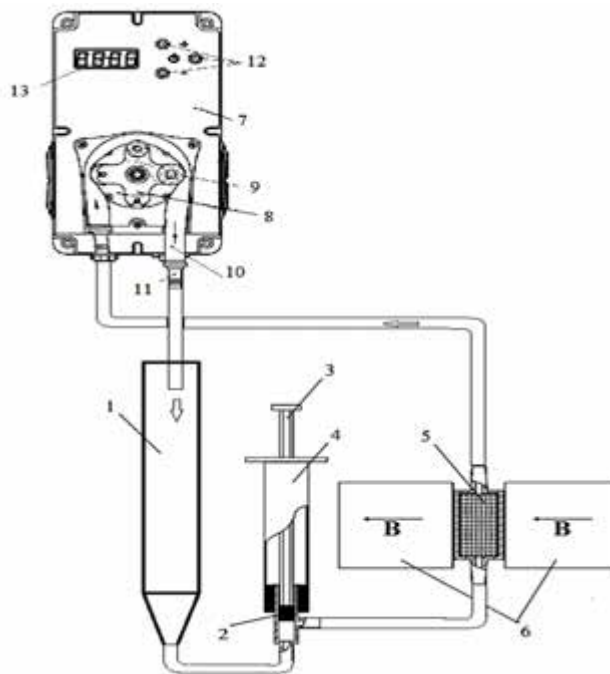


Рис.2.6. Схема експериментальної установки для досліджень процесу поділу клітин субстрату за їх магнітною сприйнятливістю

Прокачування рідини здійснюється перистальтичним дозуючим насосом 7, який містить ротор 8 з роликами, притискний ролик 9, еластичну трубку 10, ніпель 11, кнопки керування 12, дисплей 13.

У якості досліджуваних клітин, що сепаруються, використовується профільтрована рідинна фракція субстрату. Може досліджуватись і варіант субстрату, до якого додані наночастинки заліза (Fe) та оксиду заліза ( $Fe_3O_4$ ) з метою інтенсифікації метаногенезу під впливом магнітного поля. Як буферна рідина використовується дистильована вода.

Рідинна фракція субстрату поміщена попередньо в накопичувальну ємність 1. Чиста буферна рідина поміщається в промивну ємність 4. Поршень 2, що переміщається за допомогою штока 3, встановлює два можливі положення: для прокачування субстрату або буферної рідини. За умови переміщення поршня вниз до упору, перистальтичний насос направить в сепаратор чисту буферну рідину для витіснення середовища із незахопленими клітинами.

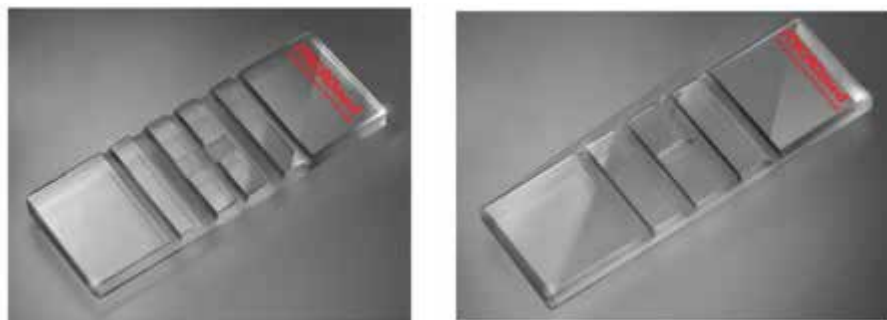
Матриця сепаратора зібрана на тримачі зі склотекстоліту та поміщена в корпус одноразового шприца. Усього в матриці 17 рядів по 8 стрижнів діаметром 0,8 мм у кожному. Відстань між центрами стрижнів ряду 1,5 мм, відстань між рядами 1,5 мм.

Сепаратор 5 розташований між полюсними наконечниками електромагніту 6, в якому здійснюється формування магнітного поля. Для вирішення завдання дослідження та підвищення ефективності роботи пристроїв, в яких необхідно створювати магнітні поля з певними значеннями індукції та неоднорідності, можливе застосування колоїдного розчину ферромагнітних наночастинок (наприклад, частинок магнетиту з розміром від 30 до 120 нм), розміщеного у скляному герметичному об'ємі прямокутної форми. Такий феррофлюїдний осередок може розміщуватися як між полюсами магнітної системи, так і поряд з магнітною системою різної конструкції. Під дією магнітного поля ферромагнітні наночастки намагнічуються і вибудовуються по силовим лініям поля. Чим менший розмір ферромагнітних частинок, то

чіткіше відтворюється ними структура силових ліній магнітного поля. На комірку, розміщену в магнітному полі, можна подати лазерне випромінювання перпендикулярно одній з її граней, а також силовим лініям магнітного поля, що проходять через цей осередок. При цьому феромагнітні частинки розташовуються на силових лініях, що утворюватимуть подобу дифракційної решітки з певним періодом. Повторюваність періоду дифракційних ґрат, наприклад, по довжині магнітної системи залежатиме від неоднорідності магнітного поля. Вихідні зображення з фотокамери далі обробляються на комп'ютері.

Зовнішнє магнітне поле, що прикладається до сепаратора, послідовно змінюється в діапазоні 0.5 - 30 мТ. Після встановлення величини поля рідина з клітинами, що сепаруються, прокачується через сепаратор протягом 10 хвилин. Клітини з певною магнітною сприйнятливістю прилипають до стрижнів сепаратора. Для промивання відсепарованих клітин у промивну ємність наливається певна кількість дистильованої води. Після промивання сепаратора виходять зразки суспензій клітин, що містять виділені клітини. Концентрація клітин в отриманих зразках визначається за допомогою камери Горяєва.

Широкого поширення набула лише одна модель камери для підрахунку формених елементів крові та інших біологічних рідин. Це Камера Горяєва. Залежно від звичок лаборанта і його завантаженості можна вибрати 2-х сіткову (б) або 4-х сіткову Камеру Горяєва (а) (рис.2.7).



а

б

Рис.2.7. Моделі камери Горяєва

Зазвичай камеру Горяєва використовують для ручного підрахунку кількості формених елементів. Камера виготовлена з монолітного скла за передовою промисловою технологією. Усередині камери нанесена вимірювальна сітка методом лазерного напилення. Сітка виконана в чорному кольорі, висококонтрастна, легко виявляється. Нова технологія виготовлення гарантує точність підрахунку і простоту у використанні, під час мікроскопії. Кожна камера (або секція) для підрахунку формених елементів складається з 225 великих квадратів (15x15), з яких 25 розділені по вертикалі і горизонталі на 16 малих квадратів і – 100 порожніх квадратів, зібраних у 25 (5x5) груп по 4 квадрати в кожній. Підрахунок формених елементів здійснюють під мікроскопом у певній кількості квадратів камери Горяєва, а отримане число перераховують на 1 мкл або 1 л субстрату.

### 2.3.2. Методика оцінки впливу частоти змінного магнітного поля на метаболізм і життєздатність популяцій метаногенних бактерій.

В даний час немає однозначного пояснення механізмів впливу електромагнітних полів (ЕМП) на біооб'єкти у широкому діапазоні параметрів ЕМП . За цією методикою досліджується вплив змінного електромагнітного магнітного поля із частотою, що лежить у діапазоні 10–50 Гц, та амплітудою 5 мТл за часом експозиції 20 хвилин, на життєздатність метаногенів трьох класів — *Methanobacteria*, *Methanococci* і *Methanopyri*. Для досліджень можуть бути взяті метаногени, що магнітомарковані магнітними наночастинками. Вибір діапазону частот 10-50 Гц обумовлений тим, що багато побутових та промислових пристроїв випромінюють ЕМП у цьому діапазоні, а вибір амплітуди ЕМП обумовлений тим, що згідно з СанПіН 2.2.4.1191-03 «Електромагнітні поля у виробничих умовах» при впливі ПМП частотою 50 Гц гранично допустимий рівень індукції магнітного поля при загальному впливі на все тіло людини протягом часу менше 1 години становить 2 мТл, а при локальному впливі (кінцевості) - 8 мТл. У цьому дослідженні вибрано значення амплітуди індукції ЕМП середнє між 2 і 8 мТл.

Вплив ЕМП на досліджувані популяції клітин проводиться при розміщенні суспензій цих клітин всередині соленоїда, який підключався до джерела синусоїдальної напруги. Для визначення частки живих і мертвих клітин у досліджуваних популяціях використовувався метод підрахунку пофарбованих метиленовим синімом клітин у камері Горяєва. У якості контрольних разків використовуються зразки суспензій клітин, які не піддавалися впливу ЕМП. Експерименти проводяться у трьох повтореннях та дані усереджуються.

### 2.3.3. Принципові положення щодо розробки методик вимірювання потенціалів елементів іонних каналів.

Бактерії містять велику різноманітність іонних каналів у своїх клітинних мембранах [42]. Цитоплазматичні мембрани бактерій, архей відіграють важливу роль у передачі енергії, що вимагає жорсткої регуляції іонних каналів для забезпечення функцій клітини. Відповідно до хеміосмотичної теорії негерметична мембрана не дозволить передавати енергію, тому що потенціал мембрани тісно пов'язаний з електрохімічним градієнтом протонів і натрію, які забезпечують взаємоперетворюване джерело енергії, що пов'язує хімічну енергію клітини з транспортом і рухливістю мембрани. Іншим компонентом, який сприяє мембранному потенціалу в бактеріальних клітинах, є градієнт  $K^+$  через клітинну мембрану, оскільки внутрішньоклітинний  $K^+$  у більшості мікробів коливається від 300 до 700 мМ (мілімоль). Калій ( $K^+$ ) – це основний катіон, що знаходиться всередині клітини. Він бере участь у створенні та підтримці іонних градієнтів і мембранного потенціалу клітин.

Порівняно з тваринними клітинами, чий мембранний потенціал спокою в основному визначається градієнтом  $K^+$ , мембранний потенціал у бактеріальних клітинах, наприклад, є набагато більш негативним у діапазоні від  $-120$  до  $-200$  мВ, що вказує на важливість протонної накачки та рушійної сили натрію у визначенні мембранного потенціалу спокою у бактерій. З

огляду на те, що цитоплазматичний рН є відносно постійним і варіюється у вузькому діапазоні рН 6,0 для ацидофілів і рН 8,5 для деяких алкалофілів, градієнт рН у мікробів значно змінюється залежно від рН середовища, внаслідок чого компонент мембранного потенціалу електрохімічного градієнта протонів і натрію змінюється залежно від зовнішнього рН .

Очевидно, що при таких високих значеннях мембранного потенціалу існують сильні рушійні сили для руху іонів через іонні канали в бактеріальних мембранах. Враховуючи дуже малу ємність цитоплазматичної мембрани окремої бактеріальної або архейної клітини ( $\sim 0,1$  пФ), лише дуже невеликої кількості іонів, що протікають через іонний канал, буде достатньо, щоб викликати істотну зміну потенціалу мембрани спокою. Отже, більшу частину часу іонні канали повинні залишатися щільно закритими і відкриватися лише тимчасово, щоб забезпечити безперебійну трансдукцію енергії в бактеріальній клітині. Іонні канали (рис.2.8) є складними глікопротеїновими комплексами, що здійснюють швидкий пасивний електрогенний транспорт іонів через біологічні мембрани) [43]. Іонні канали класифікуються за їх проникністю, селективністю до різних іонів та за принципом відкривання (закривання) комірчого механізму.



Рис.2.8. Функциональная модель ионного канала [Satter, Moran, 1988].

Канали здатні вибірково відкриватися або закриватися для певних іонів ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ) при зміні мембранного потенціалу, гормональних, механічних та осмотичних впливах. Ці дії через сенсор зовнішнього стимулу впливають на роботу комірною механізму каналу.

Проникність каналів становить від  $10^6$  до  $10^8$  іонів в секунду, що на три порядки вище, ніж транспорт іонів, що каталізується помпами і переносниками, і на 11 порядків вище, ніж проста дифузія іонів через мембрану. Відмінною особливістю іонних каналів є те, що у відкритому стані вони каталізують постійний потік іонів в одному напрямку при конкретному значенні мембранного потенціалу та певному іонному середовищі. Одностороння проникність – ще одна особливість транспорту іонів через канали. У процесі транспорту через канал відбувається взаємодія іона з білком, тому пересування іонів каналами відрізняється від їх транспорту через водні пори, у яких ці взаємодії мінімальні. Провідність каналу залежить від заповнення іонами ділянок на вході та виході. Вихід іона з каналу полегшується з появою на вході каналу іншого іона такого ж знака, через електростатичне відштовхування. Однак при високих концентраціях електроліту може відбуватися насичення провідності каналу через заповнення іонами його входу та виходу і, як наслідок, блокування каналу.

У процесі пересування іона через канал молекули води гідратної оболонки іона заміщаються на полярні групи порожнини каналу. Характер взаємодії іона з молекулярними групами каналу відповідає профілю потенційної енергії іона в каналі, що представляє низку потенційних ям та бар'єрів. На рис.2.9 наведені енергетичні профілі натрієвого і калієвого каналів збудливих мембран.

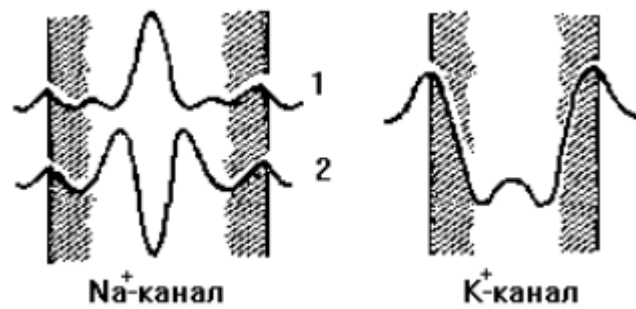


Рис.2.9. Енергетичні профілі натрієвого та калієвого каналів збудливих мембран: 1 та 2 - альтернативні моделі Na<sup>+</sup>-каналу [44].

Слід зазначити, кожен іон досить довго (порівняно з часом теплових коливань) затримується у потенційній ямі. Інший іон не може потрапити в зайняту потенційну яму через електростатичну взаємодію з іоном, що вже знаходиться там. Тому перескок можливий лише у порожню яму. Перескоки між ямами відбуваються під впливом теплових флуктуацій і залежить від напруженості електричного поля. Оскільки збільшення вільної енергії іона при дегідратації з надлишком компенсується енергією його взаємодії з полярними групами каналу, загальна енергія іона знижується, що полегшує його проходження через канал. Наявність у центрі каналу полярних груп та фіксованих негативних зарядів призводить до зниження енергетичного бар'єру для переходу катіонів із розчину в канал.

*Методика вимірювання потенціалу спокою клітини.* Основною характеристикою живої клітини, що підтримує з довкіллям стан рівноваги, є її потенціал спокою, або мембранний потенціал. За підсумками потенціалу спокою формуються всі типи електрофізіологічних процесів. Чим вищий потенціал спокою, тим він відносно стабільніший, більш виражена функціональна спеціалізація та більш висока інтенсивність обміну речовин клітини. Порушення нормального фізіологічного стану клітини, що веде до зміни її енергетики та мінерального складу неминуче веде до зміни абсолютних значень її потенціалу спокою.

Переважає більшість вимірів потенціалу спокою виконана на гігантських клітинах харових водоростей, клітинах коренів та корневих волосків, листя та провідних тканин. У порівнянні з величинами потенціалів спокою клітин тваринного походження зазвичай не перевищують -60 - -90 мВ, потенціали спокою рослинних клітин в 1,5 - 2 рази вище. Найбільш високі значення мембранного потенціалу - у зелених клітин, наприклад, у егерії, ряски та елодеї до -260 мВ. Одна з важливих функцій потенціалу спокою полягає в регуляції іонного обміну клітин та тканин із середовищем.

При введенні мікроелектроду в клітину можна зареєструвати принаймні три стрибки потенціалу: у клітинній стінці (ЕКС), на плазмалемі (ЕПМ) та на тонопласті (ЕТ) при попаданні електрода в вакуоль. Тому потенціал спокою клітини (ЕПП чи ЕПМ) дорівнює:

$$E_{пп} = E_{кс} + E_{пм} + E_{т}. \quad (2.2)$$

Електроди, які застосовуються для вимірювання мембранних потенціалів, являють собою тонкі скляні капіляри з відкритим кінцем, заповнені розчином якогось електроліту і приєднані через хлорсрібний або каломельний електрод до однієї з клем мілівольтметра з високим вхідним опором. До другої клемі мілівольтметра приєднується такий же електрод (електрод порівняння), занурений у зовнішній розчин (рис. 2.10 ).

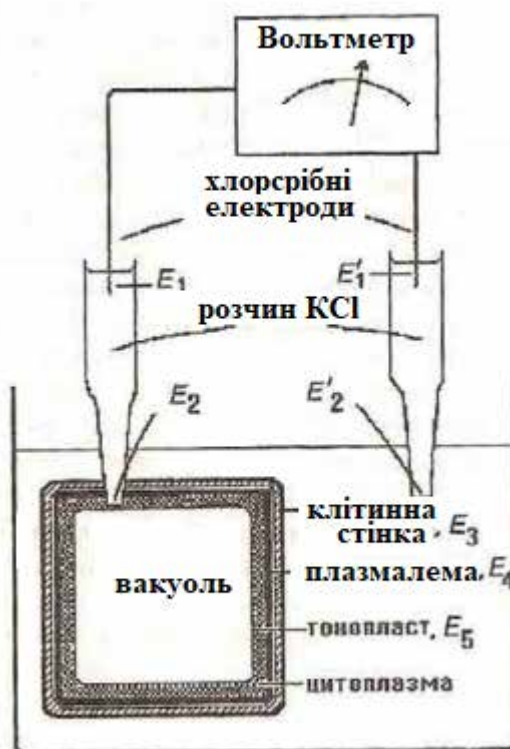


Рис.2.10. Електрична схема, що застосовується для вимірювання мембранних потенціалів рослинних клітин [45]

Для виготовлення мікроелектродів застосовують спеціальні тугоплавкі сорти скла (наприклад, скло Пірекс). Зазвичай використовують мікроелектроди з кінчиком, діаметр якого не перевищує 1 мкм. Мікроелектрод, що вводиться в клітину, повинен мати також і відповідну конусність, щоб звести до мінімуму пошкодження досліджуваного об'єкта. Мікроелектроди заповнюють 2,5 моль/л розчином КСІ або  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , що дозволяє зменшити дифузійний потенціал на кінчику електрода, так як іони  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  і  $\text{Cl}^-$  мають досить близькі рухливості. Електроди з діаметром кінчика 1 мкм і менше, заповнені 3 моль/л КСІ, мають опір 10-100 мОм. Інтенсивність дифузії електроліту з кінчика таких мікроелектродів становить  $6 \cdot 10^{-14}$  моль/(к.с).

Мікроелектрод вводять у клітину за допомогою мікроманіпулятора, стежачи за ним у мікроскоп або біокулярну лупу.

*Визначення електрокінетичного потенціалу течії.* На межі розділу між твердою дисперсною фазою та рідким дисперсійним середовищем, як уже зазначалося, існує подвійний електричний шар. Для рослинних тканин роль дисперсної фази виконують целюлозні оболонки клітин (судин), яких сорбуються переважно аніони. Катіони ж, як правило, залишаються в дисперсійному (рідкому) середовищі. В результаті між двома фазами (твердою та рідкою) за рахунок асиметричного розподілу іонів виникає електрокінетичний, або (дзета)-потенціал. Уявімо, що через посудину рослини, в якій існує різниця потенціалів між його твердою та рідкою фазами, проходить струм рідини (транспіраційний, наприклад), а разом ним - винос іонів (катіонів) у напрямку потоку. Тому знак потенціалу у напрямі потоку буде позитивним. Це явище вперше у 1859 р. описав Квінке. Він виявив, що з протіканні води через пористе тіло з його кінцях виникає різницю потенціалів, названа їм потенціалом течії. Потенціал течії можна розрахувати за формулою Гельмгольца Смолюховського:

$$E_{пт} = P\varepsilon\zeta/4\pi\nu\eta, \quad (2.3)$$

де  $P$  - перепад гідростатичного тиску,  $\varepsilon$  - діелектричне постійна середовища,  $\nu$  - електропровідність і  $\eta$  коефіцієнт в'язкості розчину.

З формули видно, що якщо немає перепаду тиску, потенціал течії дорівнює нулю.

#### 2.4. Удосконалення методики використання мікробних електролізних комірок в біореакторах

Мікробні електролізні комірки (МЕК) – це нова технологія, яка стане важливою частиною майбутніх заводів з біопереробки відходів для перетворення відходів на продукти [46].

На рис.2.11 показано схему МЕК, в якій використовуються екзоелектрогенні мікроби на аноді для перетворення біорозкладних субстратів, таких як органічні речовини у стічних водах, в електричний струм та вивільнення протонів ( $H^+$ ). Потім електрони переносяться на катод для відновлення протонів для виробництва  $H_2$ . Оскільки мікробний електроліз є ендотермічним (позитивна вільна енергія Гіббса, поглинання тепла), він не відбуватиметься спонтанно, якщо парціальний тиск водню не буде надзвичайно низьким. Тому, щоб утворити  $H_2$  на катоді, необхідно форсувати генерацію струму, прикладаючи невелику напругу між двома електродами. Загалом, прикладена напруга (0,2–0,8 В) для подолання термодинамічного бар'єру набагато нижча, ніж при традиційному електролізі води (1,8–3,5 В), і може бути забезпечена невеликою сонячною панеллю, низькопотенційним теплом або мікробними паливними елементами (МПЕ). Розрив у введенні енергії між мікробним та чистим електрохімічним електролізом забезпечується хімічною енергією, що зберігається в органічних речовинах. Окрім  $H_2$ , інші неорганічні та органічні хімічні речовини, такі як  $CH_4$ ,  $H_2O_2$  та мурашина кислота, також отримуються за допомогою подібного процесу.

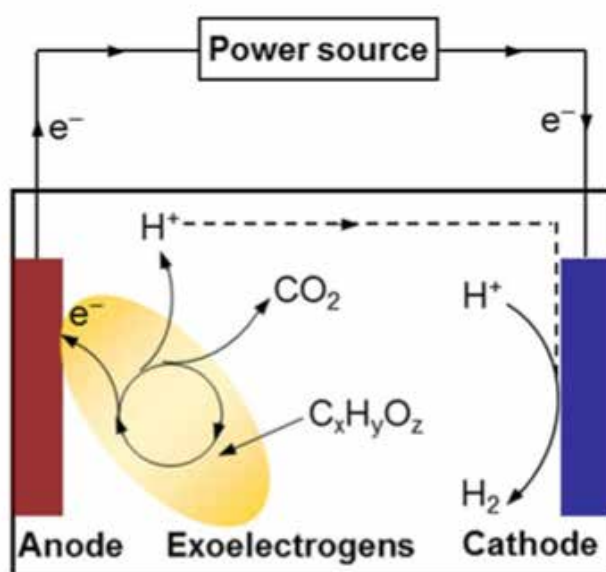


Рис.2.11. Схема процесів в мікробній електролізній комірці

Ключові параметри, такі як субстрат, об'єм реактора та прикладена напруга, впливають на продуктивність  $H_2$  в МЕК (струм, вихід  $H_2$  енергоефективність тощо).

## 2.5. Висновки до розділу 2

Розроблені два варіанти конструктивного виконання занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП), що виконує одночасно функції асинхронного приводу, пристрою, що перемішує, індукційного нагрівача і електромагнітного осцилятора.

Запропоновані методи досліджень процесів біометаногенезу під керуванням дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань.

Сформовані принципові положення щодо розробки методик вимірювання потенціалів елементів іонних каналів, які можуть бути застосовані при дослідженнях процесів анаеробного бродіння з використанням електрофізичних методів впливу.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОГО ВПЛИВУ НА ПРОЦЕСИ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ

#### 3.1 Результати моделювання системи із зовнішнім електромагнітним осцилятором занурювального електромеханічного перетворювача

Векторний магнітний потенціал виявляє тісний зв'язок з поняттям імпульсу. Якщо заряджена частинка знаходиться поблизу джерела магнітного поля, то при його зміні вона набуває додаткового імпульсу  $\Delta p = qA$ . Таким

чином, ми можемо безпосередньо керувати можливим рухом частинок через векторний потенціал у макроскопічній системі.

Очевидно, що можливо керувати хімічними реакціями через взаємодію магнітного векторного потенціалу з хімічним потенціалом. Векторний потенціал описує не тільки механічний імпульс, але й всю кінетичну енергію частинки і, отже, повинен містити всю інформацію про «магнітні» взаємодії цієї частинки [40]. На рис. 3.1 показано картину розподілу векторного магнітного потенціалу у вигляді кольорового зрізу та контурних ліній (z-компонента) в активній частині електромеханічного перетворювача, а на рис. 3.2 – поверхню ротора як z-компоненту напруженості електричного поля.

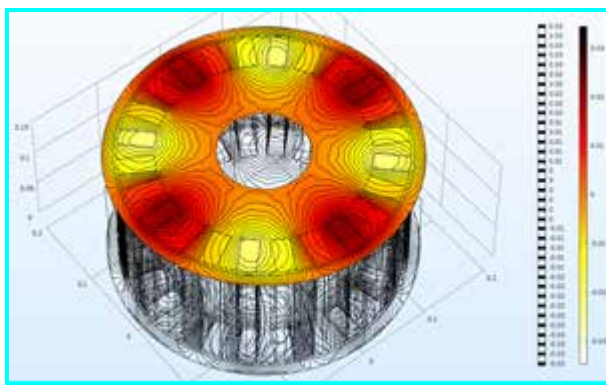


Рис. 3.1. Векторний розподіл магнітного потенціалу у вигляді кольорового зрізу та контурних ліній в активній частині

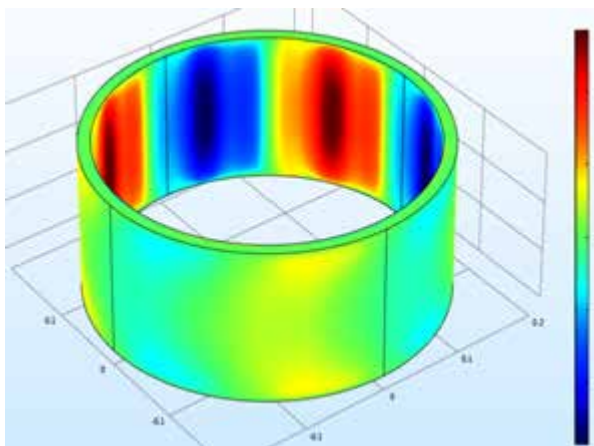


Рис. 3.2. Поверхня ротора: z-компонента напруженості електричного поля

Існує кілька факторів, які, здається, впливають на біостимуляцію вивільнення метану: стимуляція генерації метаногенних мікроорганізмів; інтенсивність потоку; тип потоку (коливальний або статичний); орієнтація та частота магнітного поля та тривалість впливу (рис. 3.3).

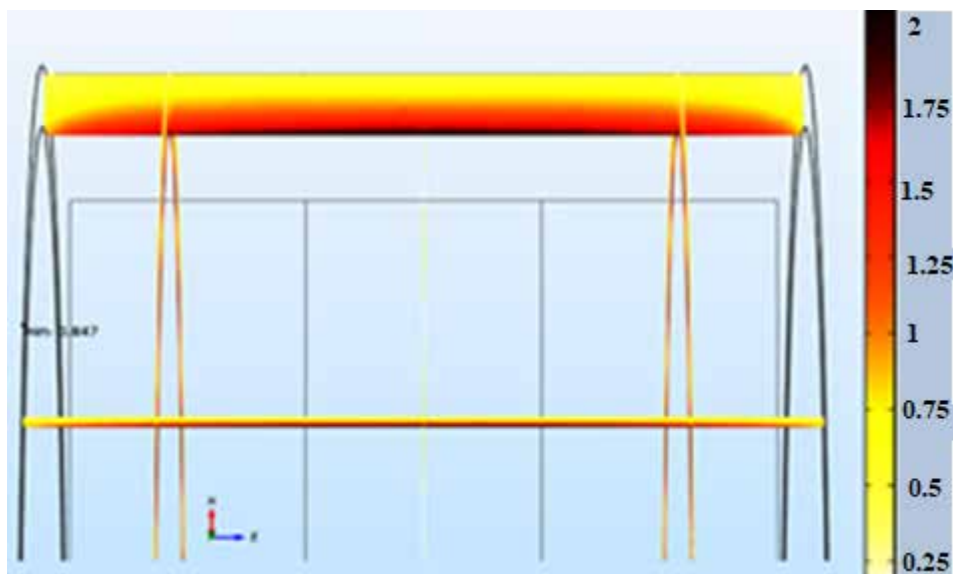


Рис. 3.3. Розподіл магнітної індукції в стінці порожнистого ротора у вигляді поздовжнього зрізу

У складі ферментаційного субстрату дипольні молекули змінюють своє положення, і цей молекулярний рух координується частотою магнітного змінного поля. В процесі анаеробного бродіння органічної сировини, що відбувається в результаті життєдіяльності бактерій, на зовнішній поверхні порожнистого феромагнітного циліндра (рис.3.3) діє низькочастотне магнітне поле, амплітуду якого можна регулювати від 25 мТл до 500 мТл, а частоту від 8 до 55 Гц, шляхом подачі квазічастотної напруги від частотного регулятора на статори.

Виходячи з розподілу рівнів напруженості електричного поля (рис. 3.2 ) створюються можливості формування мікробних електролізних комірок безпосередньо на стінках порожнистого ротора ПЕМП (можливо з використанням лопатів як електродів МЕК). При цьому реалізується схема процесів в мікробній електролізній комірці (див. рис.2.11). Щоб утворити  $H_2$  на катоді, необхідно форсувати генерацію струму, прикладаючи невелику напругу

між двома електродами. Оскільки різниця потенціалів по контурам вихрових струмів має змінний за знаком характер, повинна бути передбачена наявність малопотужного мостового випрямляча. Загалом, прикладена напруга (0,2–0,8 В) для подолання термодинамічного бар'єру набагато нижча, ніж при традиційному електролізі води (1,8–3,5 В).

Збільшення ступеня руху та спрямованої орієнтації органічних молекул у ферментаційній масі призводить до збільшення ймовірності контакту між полярними частинами метаногенних мікроорганізмів та органічною масою.

### 3.2. Результати експериментальних досліджень інтенсивності виходу біогазу та біометану при впливі обертового магнітного поля

На рис.3.4 -3.6 представлені результати експериментальних досліджень інтенсивності виходу біогазу та біометану в міру витрачання субстрату при впливі та без впливу обертового магнітного поля.

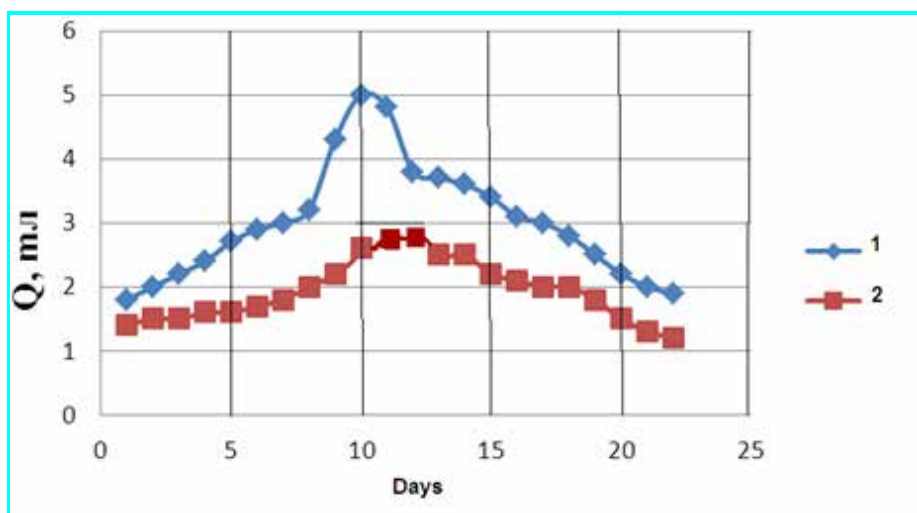


Рис. 3.4. Вихід біогазу при впливі обертового магнітного поля з індукцією 3,5 – 5 мТл, на субстрат (1) і без впливу магнітного поля (2)

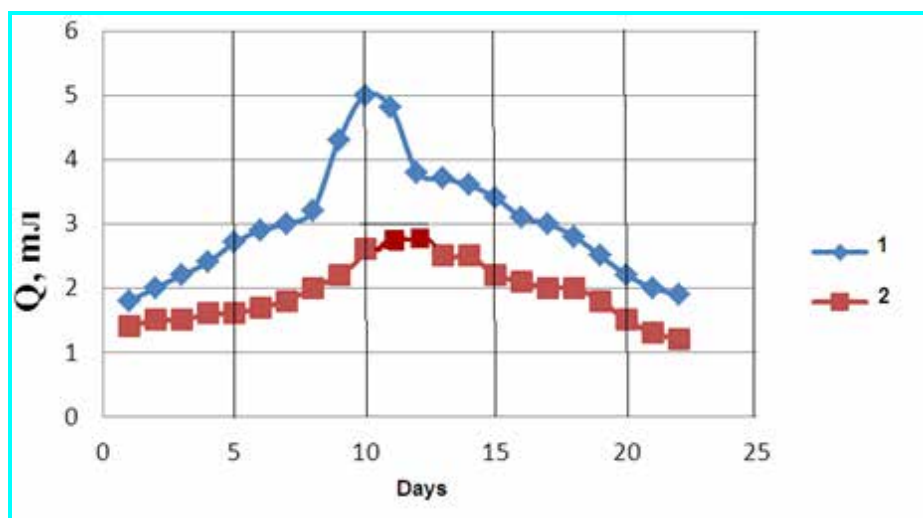


Рис. 3.5. Вихід біометану при впливі обертового магнітного поля з індукцією 3,5 – 5 мТл, на субстрат (1) і без впливу магнітного поля (2)

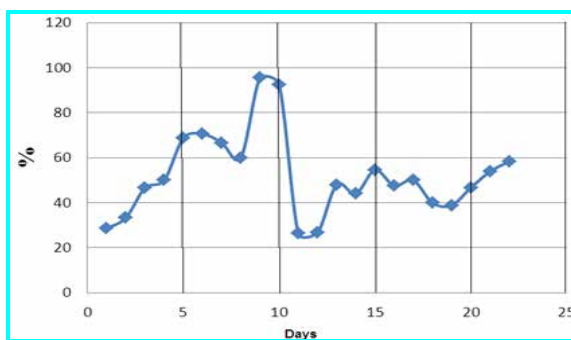


Рис. 3.6. Інтенсивність виходу біометану із субстрату, на який впливали електромагнітним полем по відношенню до виходу біометану із субстрату без впливу

Під впливом низькочастотного магнітного поля у процесах анаеробного бродіння відбувається збільшення інтенсивності виходу біогазу та біометану в міру витрачання субстрату відповідно в 1,5 та 1,7 рази, збільшення частки біометану у складі біогазу в порівнянні з контрольним зразком на 5%; Крім того, відзначено прискорення настання максимуму виходу біометану на два дні порівняно з контрольним зразком та значне посилення інтенсивності у початковий період бродіння.

До біотропних параметрів низькочастотного магнітного поля, що обертається, визначальними біологічно значущі фізико-хімічні механізми дії

фізичного фактора на субстрат слід вважати: інтенсивність магнітного поля; кругову частоту; градієнт поля; частоту та форму імпульсу; тривалість дії.

3.3. Результати експериментальних досліджень інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей пташиного посліду з речовинами з вмістом лігніну під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань

На рис. 3.7, рис. 3.8. відповідно показана зміна кумулятивного виходу біогазу та метану в часі у дослідних біореакторів.

Процес метанового бродіння з фазою експоненційного росту відбувся в усіх реакторах, що дає змогу порівняти кінетику виходу біогазу. Проведені повторні експерименти за таких же умов дали ідентичні результати з відхиленням не більше ніж на 3%, що свідчить про їх достовірність.

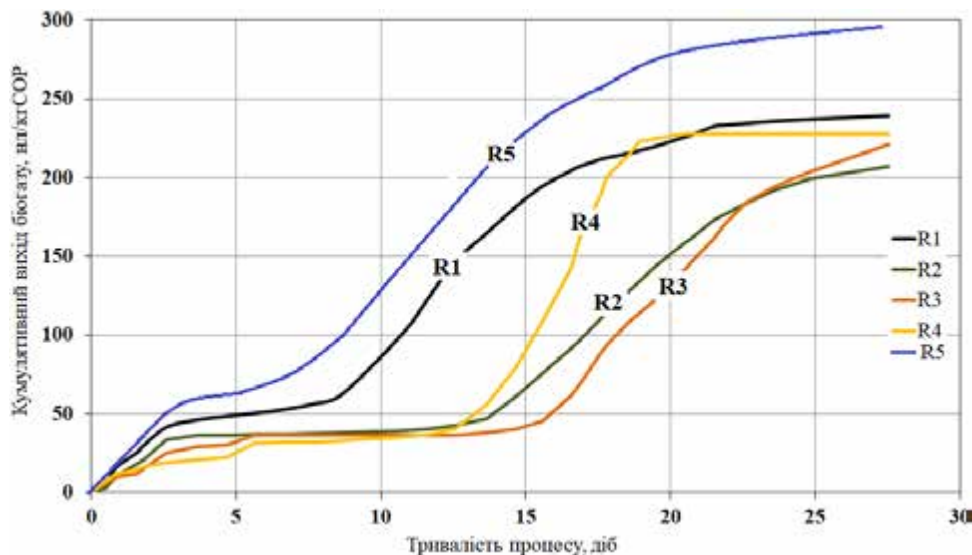


Рис. 3.7. Зміна кумулятивного виходу біогазу в часі

Розвиток процесів є відмінним у різних реакторах і суттєво відрізняється по тривалості лаг-фази процесу, зокрема між реактором R5 (5 днів) та чотирма іншими реакторами (12-16 днів). Нахили кривих також помітно відрізняються, зокрема різницю добре видно при порівнянні реакторів R1, R4, R5 з реакторами R2 та R3.

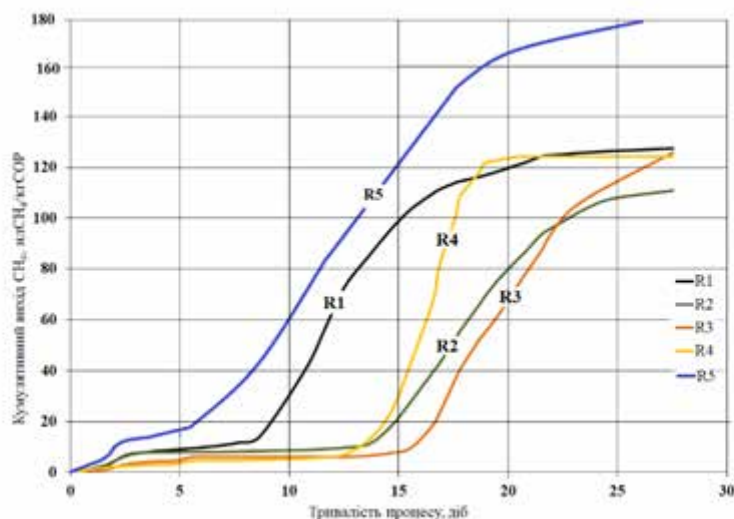


Рис. 3.8. Зміна кумулятивного виходу  $\text{CH}_4$  в часі

Аналіз кривих показує, що при обраній стартовій концентрації VS суміші ПК та СПП в реакторах 48,8 г VS /кг відбулось початкове зростання швидкості утворення біогазу впродовж 2-х перших діб, після чого почалось стрімке інгібування продуктами розпаду

Одним з основних результатів даних досліджень є установлення факту інгібуючої дії на активність метанових бактерій високої напруженості електричного поля, що створюється електричним нагрівальним кабелем у біосистемі реакторів R1-R4. Це виявилось значному збільшенні лаг-фази процесу, зниженні кумулятивних показників виходу біогазу і метану в порівнянні з реактором R5, в якому низькочастотне електромагнітне поле було відсутнє. Вплив електромагнітних полів має тенденцію посилювати, або знижувати клітинну активність. Мембрани, що піддаються впливу електричного поля, заряджаються так само, як конденсатор, і це індукує потенційну трансмембранну енергію. Однак, якщо різниця потенціалів перевищує 1В, це спричиняє клітинну загибель. Бактеріальна смертність зростає пропорційно інтенсивності прикладеного поля та загальної тривалості впливу [28]/

]. У більшості відомих досліджень напруженість електричної складової змінного електромагнітного поля не реєструвалася, однак є експериментально

встановлений рівень максимально допустимої напруженості постійного електричного поля 200 В/м [35].

Іншим важливим результатом досліджень є експериментальне підтвердження сприятливого впливу магнітного поля на діяльність метанових бактерій. У наших дослідженнях були створені умови впливу статичного магнітного поля (реактор R5), а також статичного магнітного поля в період паузи та магнітодинамічного поля з частотою 2 Гц при періодичному перемішуванні (біореактори R1 та R4). Незважаючи на негативну дію високої напруженості електричної складової змінного електромагнітного поля біореактори R1, R4 показали високі поточні швидкості біогазу і метану. Раніше ми представляли результати експериментів з низькочастотним магнітним полем, що обертається, які формують напрямок вдосконалення: виробництва біогазу з високою часткою метану.

Високий рівень магнітної індукції, що постійно діє, 400-500 мТ на поверхні магнітів, розташованих на лопатях мішалки, у поєднанні з високою електричною напруженістю нагрівальних кабелів призводить до ще більшого зменшення робочого об'єму біореактора, де може ефективно розвиватися процес метаногенезу. Тим не менш, зони субстрату з рівнем індукції 10-70 мТл були областями ефективного анаеробного процесу, що узгоджується з результатами інших досліджень [47, 24, 25, 35]. Оскільки досліджені суміші субстрату високу концентрацію аміаку (а також іонів амонію), можна припустити, що при впливі магнітного поля були створені умови для оптимізації концентрації аміаку всередині біореакторів R1, R4, R5 поряд з додаванням соломи пелетів. Мікроорганізми потребують аміаку як поживну речовину для свого метаболізму і в той же час висока концентрація аміаку вважається інгібітором анаеробного зброджування. Слід зазначити, що поєднання постійного перемішування та дії магнітодинамічного поля з частотою 2 Гц (біореактор R4) сформувало найвищі рівні швидкості виходу біогазу та метану, незважаючи на інгібуючу дію високої напруженості електричного поля та зменшення тривалості лаг-фази процесу.

*Основна технічна проблема, з якою стикається технологія впорскування  $H_2$  всередину біогазового реактора для зв'язування з ендогенним  $CO_2$ , пов'язана зі збільшенням рівня рН до значень вище 8,5, що призводить до пригнічення метаногенезу. Щоб полегшити цю технічну проблему, було запропоновано спільне зброджування з кислими відходами для запобігання підвищенню рН. Альтернативним підходом до вирішення цієї проблеми буде застосування контролю рН, що може забезпечити переробку до майже чистого біометану. Додатковим ключовим параметром є розчинність  $H_2$  у рідкій фазі, оскільки він повинен перетинати межу розділу між газом та рідкою фазою, щоб бути доступним для мікроорганізмів. Розчинність більшості газів у воді є досить низькою, що обмежує масообмін газ-рідина та перешкоджає роботі біореактора. З цієї причини матеріал та тип модуля, який використовується для введення  $H_2$ , застосування потоків рециркуляції газу та конструкції реактора вважаються фундаментальними елементами для реалізації *in situ* модернізації біогазу.*

Отже, наші ідеї до впливу на розчинність та рН субстрату через вплив електромагнітного поля можуть бути доречними і ефективними.

### 3.4. Висновки до розділу 3

1. Проведення експериментів з низькочастотним магнітним полем, що обертається, формує два напрямки:
  - виробництво високоякісного біогазу (> 50% метану) шляхом стимуляції метаногенних мікроорганізмів в електромагнітних полях;
  - скорочення часу ферментації та неявне підвищення енергоефективності біогазових установок
2. Під впливом низькочастотного магнітного поля у процесах анаеробного бродіння відбувається збільшення інтенсивності виходу біогазу та біометану в міру витрачання субстрату відповідно в 1,5 та 1,7 рази, збільшення частки біометану у складі біогазу в порівнянні з контрольним зразком на 5%; Крім

того, відзначено прискорення настання максимуму виходу біометану на два дні порівняно з контрольним зразком та значне посилення інтенсивності у початковий період бродіння.

3. До біотропних параметрів низькочастотного магнітного поля, що обертається, визначальними біологічно значущі фізико-хімічні механізми дії фізичного фактора на субстрат слід вважати: інтенсивність магнітного поля; кругову частоту; градієнт поля; частоту та форму імпульсу; тривалість дії.

4. Основним результатом досліджень є уточнення параметрів та умов інтенсифікації процесів біометаногенезу сумішей пташиного посліду з речовинами із вмістом лігніну під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів та механічних коливань для біореакторів фермерських господарств.

5. Встановлено інгібуючу дію на активність метанових бактерій високої напруженості електричного поля, що створюється електричним нагрівальним кабелем у біосистемі реакторів, виконаних із пластику. Це виразилося у значному збільшенні лаг-фази процесу, зниженні кумулятивних показників виходу біогазу та метану в порівнянні з реактором, в якому низькочастотне електромагнітне поле не було. Застосування електричного нагріву всередині та зовні біореактора допустиме за наявності екранування, яке забезпечує допустиму для колоній метанових бактерій напруженість постійного електричного поля (не більше 200 В/м).

6. Іншим важливим результатом досліджень є експериментальне підтвердження сприятливого впливу магнітного поля на діяльність метанових бактерій при впливі статичного магнітного поля або магнітодинамічного поля з частотою 2 Гц та періодичним перемішуванням субстрату (до трьох разів на добу).

## РОЗДІЛ 4

### МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ЗАНУРЮВАЛЬНОГО ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Удосконалення методики визначення параметрів схеми заміщення занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача проведене з метою підвищення енергоефективності і точності управління процесами електрофізичного впливу на субстрати в біореакторах.

#### 4.1 Методи визначення параметрів схеми заміщення асинхронних машин традиційної конструкції

Трифазні асинхронні двигуни (АД) є електричними машинами, які найбільш широко використовуються в промисловості завдяки своїй досконалості. Схема заміщення АД дуже важлива для аналізу його характеристик і продуктивності. Формування схеми заміщення почалось із концепції ідентифікації відображення на основі моделі, яка раніше використовувалася для визначення параметрів АД за допомогою динаміки перехідних процесів і інтегральних методів розрахунку [48]. Стандартна процедура випробування IEEE для багатофазних асинхронних двигунів і генераторів використовує експериментальні методи для тих же цілей [49]. У роботі [50] пояснюється, як значення параметрів схеми заміщення визначаються експериментально і запропоновано метод ідентифікації параметрів (АД) у стані простою за допомогою інтегральних розрахунків. Ідентифіковано постійну часу ротора та індуктивність намагнічування. Відомі спроби використовувати каталог даних від виробника для визначення таких параметрів без будь-яких експериментів, оскільки метод IEEE Standard 112 -2017 надто складний для впровадження в польових умовах та браку ресурсів [51]. Але дані, які надають

виробники, часто є неточними, оскільки вони стосуються цілої групи двигунів, кожен із випадковими варіаціями індивідуальних характеристик. Допуски та скорочення наданих значень також можуть додати помилки до обчислень.

При розв'язанні наведених вище параметрів виникає декілька проблем [52,53], а саме: у фактичному сигналі є неминучі шуми, які заважають результатам розрахунку; фактична система набагато складніша за модель, яку ми розглядаємо, що спричиняє помилки в лінійно виведеній системі.

В роботі [54] запропоновано інший метод з використанням поліноміальної регресії, який підтверджує, що теоретичну характеристику імпедансу асинхронної машини можна виразити у формі поліноміальної частки, а параметри можна отримати за допомогою одиничних підрахунків. Для досягнення мети запропонований спосіб включає наступні етапи. На першому етапі реєструються змінні в часі сигнали напруги, струму та швидкості ротора під час запуску асинхронної машини. На другому етапі обчислюється активний і реактивний опори асинхронної машини за різних показників ковзання. На третьому етапі оцінюються параметри еквівалентної схеми асинхронної машини. На четвертому – моделюється динамічна поведінка асинхронної машини та обчислюється її вихідний крутний момент. Нарешті, розраховуються параметри еквівалентної механічної моделі.

Моделі, які найчастіше використовуються в аналізі асинхронних машин, можна розділити на дві категорії: модель перехідного процесу та модель стаціонарного стану. Оскільки час перехідного процесу асинхронної машини дуже короткий, перехідний процес, викликаний індуктором, швидко впаде до незначного діапазону на ранній стадії запуску, тому в характеристиках напруги та струму домінуватиме імпеданс стаціонарного стану. Еквівалентна схема асинхронної машини в усталеному режимі показана на рис.4.1, де  $R_s$  — активний опір статора;  $R_r$  - активний опір ротора, приведений до статора;  $X_m$  - реактивний опір збудження;  $X_s$  - еквівалентний реактивний опір статора;  $X_r$  -

реактивний опір ротора, приведений до статора;  $Z$  - вхідний опір;  $R$  - вхідний опір;  $X$  - вхідний реактивний опір;  $s$  – швидкість ковзання.

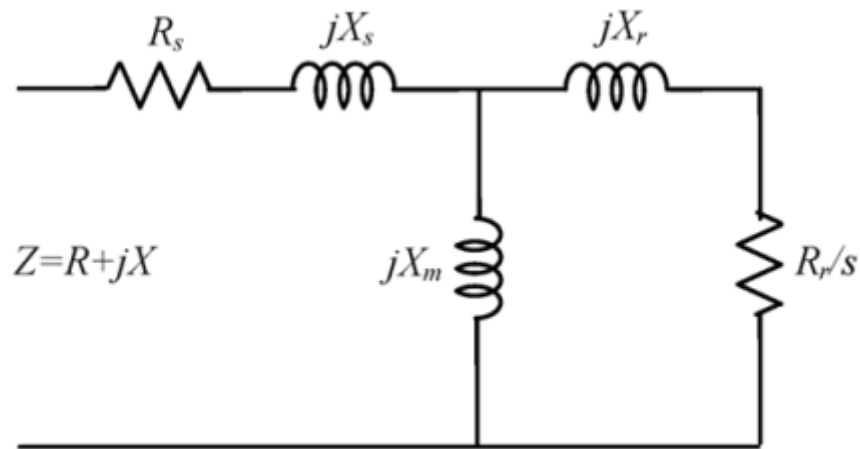


Рис.4.1. Стаціонарна еквівалентна схема АД

Вхідний опір асинхронної машини можна виразити як

$$R + jX = R_s + jX_s + \frac{jX_m(R_r/s + jX_r)}{jX_m + (R_r/s + jX_r)}. \quad (4.1)$$

Для отримання відповідних параметрів використовувалася поліноміальна дробова регресія. Коли індукційна машина запускається, миттєві значення напруги, струму та швидкості обертання можна отримати через датчики. З цих миттєвих значень можна отримати ряд ефективних значень, що змінюються в часі [55]. Ряд даних,  $n$ , можна отримати з наведеного вище експерименту

$$(R_n, X_n, s_n), \quad n = 1, \dots, N. \quad (4.2)$$

Запропоновані методи вимагають високого рівня математики, яким, як правило, не віддають перевагу практики. Є пропозиція оцінки еквівалентних параметрів за допомогою моделювання Matlab-Simulink на основі даних результатів машинних випробувань [56]. На відміну від інших, авторів роботи [57] більше цікавить еквівалентна схема, а не методи. Вони запропонували нову еквівалентну схему, яка є простішою за звичайні схеми.

Автори роботи [58] встановили три моделі еквівалентних схем, а саме (рис.4.2): вихідну модель (L), проміжну спрощену модель (IEEE) і найпростішу модель (L).

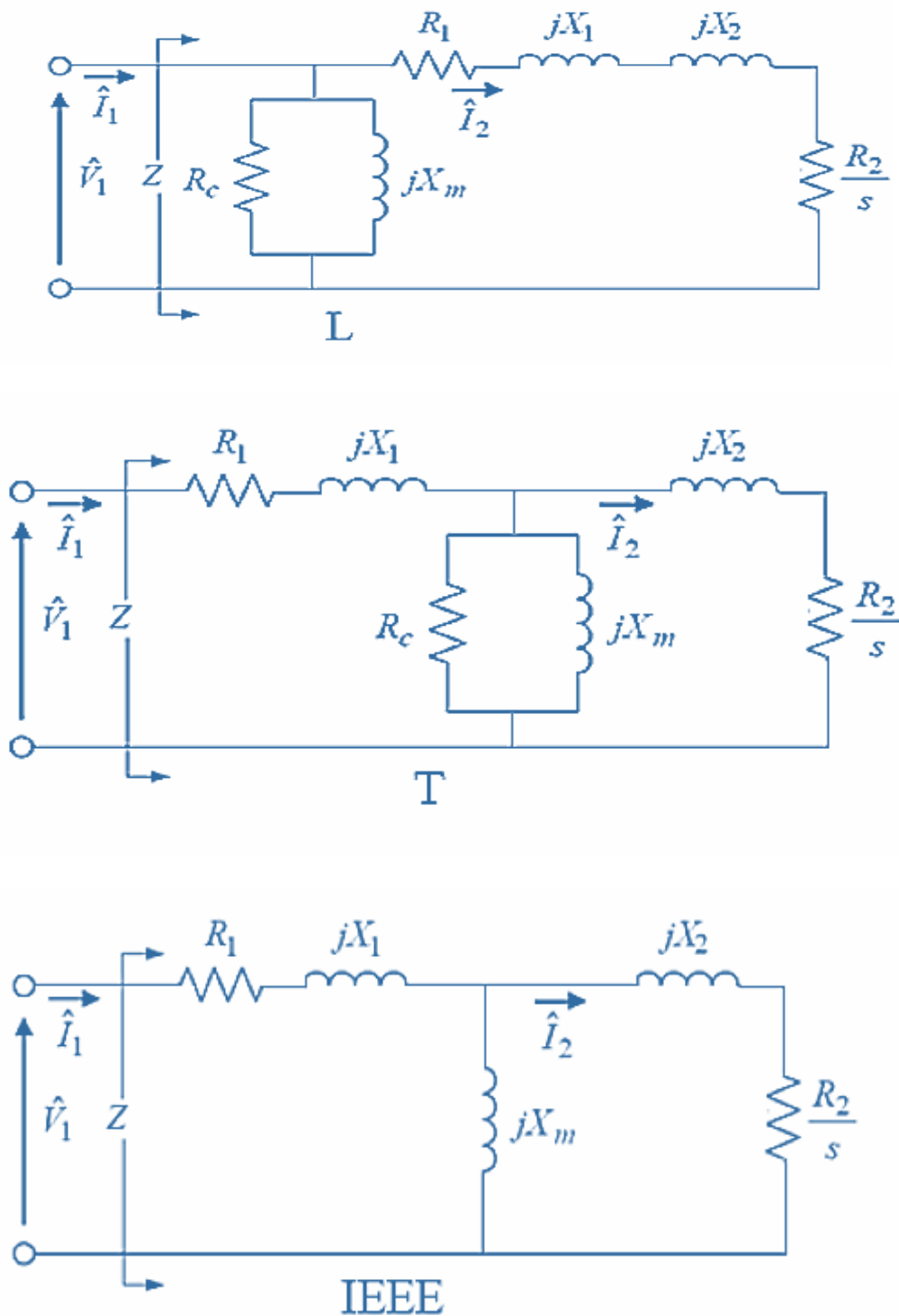


Рис.4.2. Моделі L, T та IEEE еквівалентної схеми асинхронного двигуна [57]:  $\hat{V}_1$  — напруга мережі;  $\hat{I}_1$  — струм статора;  $\hat{I}_2$  — струм ротора;  $R_1$  і  $R_2$  —

відповідно опір обмотки статора та опір ротора, зведений відносно обмотки статора;  $R_c$  — опір магнітопроводу;  $X_m$  — реактивний опір намагніченості;  $X_1$  — реактивний опір статора;  $X_2$  — реактивний опір ротора, приведений до статора;

$Z$  — еквівалентний опір, а  $s$  — значення ковзання.

Еквівалентні значення імпедансу, отримані для всіх трьох моделей, відрізняються один від одного. Це призводить, відповідно, до зміни значення струму, вихідної потужності та крутного моменту на валу. У дослідженні аналізуються найважливіші характерні властивості АД: пуск двигуна, максимальний і номінальний крутний момент. Для аналізу крутного моменту використовується моделі типу L, типу T і еквівалентної схеми IEEE 112, які досліджується за допомогою кодів, розроблених у MATLAB. По-перше, характеристика моменту ковзання асинхронного двигуна розділена на три робочі зони та визначено, яка модель еквівалентної схеми дала найкращі результати в цих досліджуваних зонах (рис.4.3).

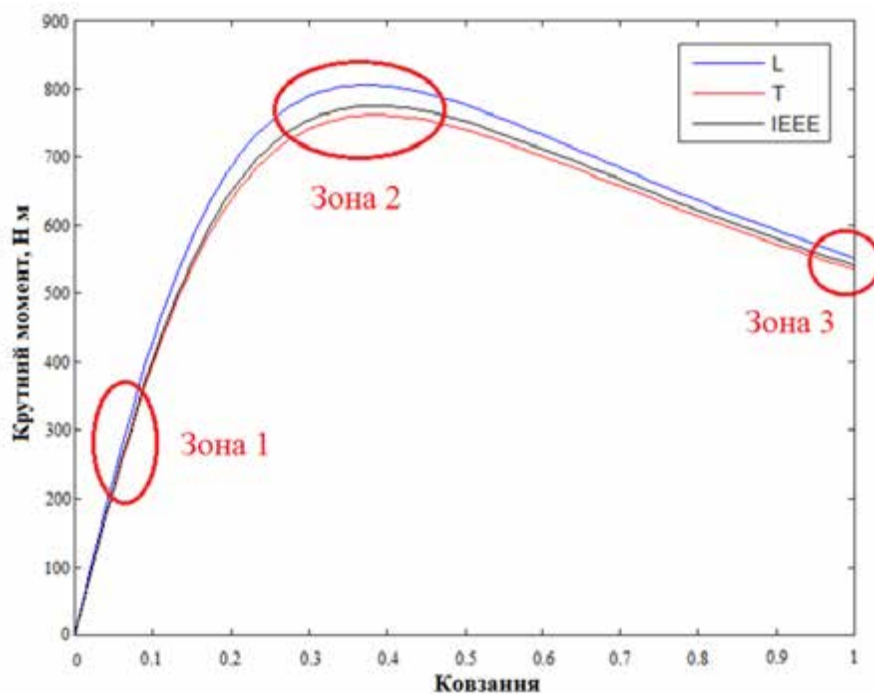


Рис.4.3. Механічні характеристики АД для моделей еквівалентної схеми L, T та IEEE

Досліджуються такі параметри, як опір статора та ротора, реактивний опір статора та ротора, реактивний опір намагніченості, опір сердечника та ковзання, щоб визначити, як впливають значення крутного моменту. В табл.4.1 наведено отримані значення для кожної з трьох моделей схеми заміщення порівняно з результатами експерименту. В аналізі використовуються параметри асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Таблиця 4.1

**Процентне значення похибки крутних моментів для трьох моделей еквівалентної схеми у порівнянні з експериментом**

Модель	Похибка $M_{\pi}$	Похибка $M_{\max}$	Похибка $M_{\text{н}}$
L тип	4,13	4,01	4,3
Tтип	0,92	-1,71	-3,82
IEEE тип	2,08	0,08	-2,71

За отриманих значень похибки з трьох моделей, еквівалентна схема типу L має найбільше значення похибки для всіх типів моментів. У початкових умовах еквівалентна схема T-типу дає значення, найближче до результату експерименту. Оскільки умови роботи занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача в біореакторах передбачають режими великих ковзань ( $s = 0,8 - 0,9$ ), то у якості еквівалентної схеми доцільно вибрати схема T-типу. За умов максимального крутного моменту еквівалентна схема типу IEEE дає майже те саме значення, що й експериментальний результат. За номінальних робочих умов еквівалентна схема IEEE також дає значення, найближче до експериментального результату. Важливими слід

вважати також результати досліджень і технічну новизну, які викладені в роботах [59,60].

#### 4.2 Методи визначення параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів з масивним ферромагнітним ротором

Дослідженню (АД) з масивним ферромагнітним ротором (МФР) було присвячено значну увагу багатьма дослідниками. Основна особливість АД з МФР полягає у складному розподілі параметрів електромагнітного поля, що спричинене загасанням електромагнітної хвилі у масиві через поверхневий ефект. При цьому магнітна проникність змінюється нелінійно залежно від глибини проникнення хвилі. У двигунах з гладким МФР, у номінальному режимі відзначаються низькі показники коефіцієнта корисної дії (ККД) та коефіцієнта потужності ( $\cos \varphi$ ). Одним із способів покращення пускових характеристик та зменшення втрат у вторинному ланцюзі є застосування неферромагнітного струмопровідного шару на роторі. Завдяки цьому знижується еквівалентний електричний опір МФР, збільшується струм у неферромагнітному шарі, а результуючий магнітний потік, що проходить через поверхневий шар масиву, зменшується. Це, у свою чергу, виводить матеріал масиву зі стану сильного магнітного насичення, що сприяє зниженню втрат у сталі ротора.

Інший підхід до підвищення енергетичних характеристик АД з МФР – це зменшення реактивної потужності, тобто струму намагнічування, без значного збільшення магнітної проникності масиву. Це реалізується у двошарових МФР, що складаються з порожнистого масивного циліндра з певним магнітним сплавом, встановленого на ярмо, набране з електротехнічної сталі. Масивний метал у таких двигунах виконує роль одночасно і короткозамкненої обмотки, і зубцевої зони, а для його виготовлення використовуються залізомідні сплави.

На сьогодні розроблено велику кількість конструктивних варіантів МФР, зокрема багат шарових структур. В асинхронних двигунах єдиних серій, що

мають підвищений пусковий момент (наприклад, з глибоким пазом ротора або подвійною короткозамкненою обмоткою), також спостерігається ефект витіснення струму, хоча у МФР він значно виразніший. Якщо відношення активного опору при пуску до номінального режиму у двигунах з двошаровим ротором становить 3-5, то у стандартних серіях воно менше – лише 2-3.

Одним із компромісних рішень є застосування зубчастого МФР, що аналогічно використанню неферомагнітного шару у гладкому роторі дозволяє покращити пускові характеристики та зменшити втрати у вторинному ланцюзі. Завдяки цьому знижується поперечний крайовий ефект. Зокрема, були розроблені АД із зубчастим МФР та торцевими короткозамкненими кільцями з міді марок М1-М3, що мають вищі показники коефіцієнта використання габариту (к<sub>р</sub>) та ККД у порівнянні з двошаровими МФР. Використання стрижневої короткозамкненої обмотки у зубчастому МФР сприяє суттєвому зменшенню активного опору та значному зниженню впливу поперечного крайового ефекту. Це, у свою чергу, мінімізує тангенціальні вихрові струми у масиві, підвищуючи ККД та коефіцієнт потужності.

У будь-якій з конструкцій МФР (рис.4.4) може бути використана тонкостінна екрануюча гільза з неферомагнітного матеріалу, а також торцеві короткозамкнені кільця.



Рис.4.4. Класифікація АД с МФР

*Порівняння характеристик АД з МФР та АД загального призначення.*

Порівняльний аналіз характеристик асинхронного двигуна (АД) з магнітним феромагнітним ротором (МФР) та АД загального призначення показує, що механічна характеристика АД з МФР зміщена в область високих ковзань значно більше, ніж у двигунів із підвищеним пусковим моментом. В АД з МФР поверхневий ефект виражений особливо різко, тому при зростанні ковзання активний опір МФР зростає, а втрати в обмотці статора зменшуються. МФР має високу механічну та термічну стійкість, що є важливим при розробці приводів з частими реверсами та важкими умовами пуску. АД з МФР мають великі максимальний та пусковий моменти, а також меншу тривалість перехідного процесу при пуску. Втрати енергії у вигляді тепла під час перехідних процесів в обмотках статора менші, а основний максимум теплових втрат припадає на вторинний ланцюг АД з МФР.

Порівняно з шихтованими роторами, АД з МФР мають такі переваги:

- При рівних габаритах, однаковій густині струмів і моментах інерції ротора втрати енергії під час механічних перехідних процесів у МФР і в обмотці шихтованого ротора однакові, а втрати в обмотках статора для АД з МФР значно менші.
- АД із МФР забезпечує меншу тривалість механічних перехідних процесів порівняно з АД єдиних серій.
- При високих значеннях ковзання енергетичний фактор (добуток ККД та  $\cos\varphi$ ) АД з МФР вищий, ніж у АД єдиних серій.
- Завдяки вищому коефіцієнту потужності в зоні високих ковзань добротність АД з МФР на цій ділянці вища, ніж добротність АД єдиних серій.

АД з МФР потужністю до 200 кВт застосовуються у герметичних насосах для перекачування теплоносіїв в атомних енергетичних установках. МФР цих машин виготовлений з хромистої сталі марки 1Х17Н, яка має знижену відносну магнітну проникність і порівняно високий питомий електричний опір. Для

покращення енергетичних показників і збільшення корисної потужності в МФР встановлюють короткозамкнені стрижні.

*Конструктивні особливості екранованих АД з МФР.* У таких двигунах пакет статора з обмотками герметично відокремлений від простору, зайнятого МФР, за допомогою екрану. Екран являє собою тонкостінну неферромагнітну металеву гільзу, запресовану у внутрішній діаметр пакета статора. Завдяки цьому вдається усунути вплив агресивного середовища на первинну обмотку. Такі двигуни називають безсальниковими з "мокрим" ротором. Оскільки вони виконуються разом із приводним механізмом (насоси, компресори), відпадає необхідність у складних і малонадійних ущільненнях у місцях проходження валів, що обертаються. У матеріалі екрану наводяться вихрові струми, які спричиняють додаткові втрати. Теплові втрати в екрані та втрати ковзання в

Для АД з МФР мінімальної та середньої потужності пускові і робочі показники мають найкращий вигляд, коли значення  $\mu_r$  масиву лежать у інтервалі (20÷50) в.о., а саме (20÷25) в.о. в момент пуску (враховуючи сильне насичення МФР при пуску потоками розсіювання) та (40÷50) в.о. у номінальному режимі. Точка Кюрі для забезпечення сталості магнітних властивостей масиву повинна бути не меншою (300÷350) °С. У машинах малої та середньої потужності, розрахованих на тривалий режим роботи, для матеріалу МФР значення  $\rho$  повинні лежати в інтервалі  $(1,0\div 2,0)\cdot 10^{-7}$  Ом·м.

АД з МФР має більш високу добротність пуску. Заміною шихтованого короткозамкненого ротора двошаровим МФР можна досягти в середньому збільшення початкового пускового моменту в 1,5 рази та зменшення початкового пускового струму в 1,4 рази. Поряд із вирішенням проблеми пуску АД від малопотужної мережі застосування МФР призводить до зменшення втрат, спричинених зменшенням падіння напруги під час пуску. Пускові втрати в АД з МФР, зумовлені зниженням напруги мережі, тим менше (порівняно з АД із шихтованим короткозамкненим ротором), чим більше момент опору при пуску. Так, втрати енергії в АД з двошаровим МФР

при прямому пуску в 3,8 рази менше, ніж у АД з шихтованим короткозамкненим ротором, а при пуску через додатковий опір в ланцюзі АД з шихтованим ротором і фазною обмоткою пускові втрати зменшуються в 2,2. Якщо в умовах важких пусків АД працює в інтенсивних старт-стопних режимах, застосування МФР дає найбільший ефект.

На підвищених ковзаннях АД з МФР порівняно з АД із шихтованим ротором забезпечують найкращі енергетичні показники (починаючи від значень  $s$  порядку 0,146).

Поширюються спроби більшого використання АД з МФР в регульованому електроприводі. По-перше, це дозволяє забезпечити підвищення енергетичних показників у частотних приводах з частими реверсами та гальмуваннями, так як в результаті інвертування струмів у фазах первинної обмотки при жорсткому режимі управління та здійснення гальмування фактично протиприродно, а реверсу – перемиканням, частота перемагнічування ротора, наприклад, при реверсі змінюється в подвоєному інтервалі високих ковзань. Відомо, що застосування жорсткого режиму частотного управління АД єдиних серій, у тому числі що мають спеціальну форму паза ротора (тобто з витіснення струму), обмежується на практиці не тільки економічними міркуваннями, пов'язаними з додатковими втратами, але й з нагріванням АД, оскільки струми в жорсткому режимі в більшості випадків перевищують допустимі значення, і тоді прийнятні тільки м'які режими, різко знижують продуктивність всієї системи. Крім того, оскільки АД з МФР одних габаритів з АД єдиних серій забезпечують в 1,5 рази більші значення критичного моменту, а їх механічна характеристика наближається до екскаваторної, то в частотно-регульованому приводі, навантажувальна діаграма якого характеризується "короткими піками" порядку значення критичного моменту застосування АД з МФР при погіршенні енергетичних показників в цілому дозволяє підвищити надійність роботи, особливо якщо діапазон регулювання швидкості близький до граничного, а переривання роботи системи неприпустимо.

По-друге, при менших порівняно з АД єдиних серій втратах на високих ковзаннях, в АД з МФР відкриваються сприятливі перспективи для регулювання частоти обертання найпростішим способом – шляхом зміни амплітуди напруги живлення. Використання АД з МФР у гребних приводах з регулюванням зміною напруги забезпечує необхідне число пусків і реверс гребного гвинта безпосередньо шляхом реверсу електроприводу, що виявляється складним при застосуванні АД з шихтованим короткозамкненим ротором. Експлуатаційний вид механічної характеристики АД з МФР дозволяє ефективно використовувати їх у приводах з вентиляторним моментом опору при регулюванні швидкості в широкому діапазоні зміною напруги, що підводиться.

Основним режимом ПЕМП слід вважати зустрічне обертання полів, при якому модуль ГМ функціонує з ковзанням  $s_G > 1$ , тобто у режимі електромагнітного гальма. Для рухового модуля ПЕМП проектна потужність вибирається виходячи з суми теплової  $P_T$  і механічної  $P_{\text{мех}}$  потужностей. Для гальмівного модуля, що працює в режимі противовключення, - тільки теплової. Зазначені потужності, довжина пакета статора  $l_\delta$  зовнішній  $D$  та внутрішній  $D_{\text{вн}}$  діаметри статора, полюсна поділка  $\tau$ , питома поверхнева потужність ротора  $p_o$  визначаються по результатам теплових і гідродинамічних розрахунків. За величиною  $p_o$  знаходяться відносна магнітна проникність  $\mu_2$  і, з урахуванням розрахункової температури ротора, питомий електричний опір  $\rho_2$  масивного ротора [61]. Одним з найважливіших вихідних даних, які недоступні для звичайних масивнороторних машин, є втрати в роторі. У нашому випадку втрати в роторі вже відомі за попередніми тепловим і гідродинамічним розрахунками і з'являється можливість визначити відповідно попереднє значення МРС, комплексного магнітного опору і основного магнітного потоку ділянки ротора, що припадає на окремий модуль [39] :

$$F_2 = k_\phi k_\Delta P \sqrt{\frac{\sqrt{s_n} \cdot \operatorname{Re}(A) P_n (L_2 + \tau)}{\pi l_\delta m \cdot \sqrt{\rho_2 \mu_e f_1}}} \quad (4.1)$$

$$Z_{2\mu} = k_\phi k_\Delta A \sqrt{\frac{f_2}{\rho_2 \mu_e}} \quad (4.2)$$

$$\Phi_1 = \frac{F_2}{|Z_{2\mu}|} \quad (4.3)$$

де  $A = 1,13 + j1,85$  - коефіцієнт Неймана;  $P_n$  - розрахункова потужність;  $m$  - число фаз;  $\rho_2 = f(t_{ром})$  - питомий опір сталі ротора;  $\mu_e$  - відносна магнітна проникність матеріала ротора;  $L_2$  - довжина активної частини ротора;  $k_\phi$  - коефіцієнт форми поля;  $k_\Delta = f(l_\delta / \tau)$  - коефіцієнт відносного подовження ротора.

Наведене значення модуля вторинного струму, необхідного для попереднього розрахунку параметрів масивного ротора, знаходимо за формулою

$$|I'_2| = \frac{\pi p F_2}{2m \sqrt{2} W_1 k_{об}} \quad (4.4)$$

Отриманих даних досить для визначення основних величин, що характеризують статор окремого модуля ПЕМП. Далі проводиться розрахунок магнітного кола машини. Як відомо, тіло масивного ротор в розрахунок ланцюга намагнічування не входить. За відомими виразами визначаємо МРС повітряного зазору  $F_\delta$ , зубців  $F_z$ , ярма  $F_a$  и сумарну МРС  $F_\Sigma$ , знаходяться коефіцієнт насичення  $k_\mu$ , струм намагнічування  $I_\mu$  та індуктивний опір гілки намагнічування. Для натурного зразка ПЕМП індуктивний опір гілки намагнічування може бути знайдений з досліду неробочого ходу при швидкостях, близьких до синхронної швидкості обертового магнітного поля

статора. Визначаємо комплексний магнітний опір, попереднє значення МРС магнітного ланцюга і далі значення повного струму модуля

$$I_1 = \frac{\pi \cdot p \cdot F_s}{2m_1 w_1 k_{w1} \sqrt{2}} \quad (4.5)$$

Важливим етапом є розрахунок наведених параметрів ротора. Для масивного феромагнітного ротора з питомим активним опором  $\rho_2$  і магнітною проникністю  $\mu_2$  приймаємо такі обмоткувальні дані: число фаз  $m_2 = 2p$ ; число витків у фазі  $w_2 = 0,5$ ; обмотковий коефіцієнт  $k_{w2} = 1$ . Тоді аксіальна складова густини вихрових струмів на ділянці ротора для окремого модуля визначається за формулою:

$$j = \frac{2I_1' \cdot m_1 \cdot w_1 k_{w1}}{\tau \cdot p} \sqrt{\frac{\mu_2 \cdot \omega}{2\rho_2}} \quad (4.6)$$

Питома поверхнева потужність на ділянці ротора

$$p_0 = \int_0^{\infty} j^2 \rho dy = \frac{j^2 \cdot \rho}{4} \sqrt{\frac{2\rho_2}{\mu_2 \cdot \omega}}, \quad (4.7)$$

де  $y$  – координата вглибину масива ротора.

Прирівнюючи джоулеві тепловиділення на всій модульній ділянці ротора, обчислені з використанням (4.7) і вираз  $m_1 (I_1')^2 r_2'$  отримаємо шукану величину наведеного активного і далі реактивного вторинного опору

$$r_2' = a_r k_{\beta} \frac{2(w_1 k_{w1})^2}{p} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_1 \rho_2}{2}} \cdot \sqrt{\mu_s} \quad (4.8)$$

$$x_2' = \frac{a_x}{a_r} r_2' \quad (4.9)$$

де  $k_\beta = \frac{1 + \frac{2}{\pi} \cdot \beta}{\beta}$  - коефіцієнт, що залежить від співвідношення  $\beta = \frac{\tau}{L_a}$  і враховуючий опір лобової частини;  $a_R = 1,4 \div 1,6$ ;  $a_X = 0,6a_R$  - коефіцієнти, що враховують зміну магнітної проникності і гістерезис.

З (4.8) і (4.9) випливає, що параметри ротора залежать від значення величини  $\sqrt{\mu' s}$ . Оскільки відносна магнітна проникність  $\mu'$  ротора залежить від напруженості магнітного поля на поверхні ротора, яка, в свою чергу, залежить від сили вторинного струму  $I_2'$ , то параметри ротора є функцією струму. Використовуючи вже відому величину вторинного струму, встановлюємо величину відносної магнітної проникності по відомим залежностям  $\mu' = f(H)$  для гілки сильних магнітних полів. При живленні одного з модулів від перетворювача частоти необхідно в формулах (4.8), (4.9) використовувати абсолютне ковзання ротора  $\gamma = \alpha_f \cdot s$ , де  $\alpha_f = \frac{f}{f_1}$  - відносна частота напруги живлення. На рис. 4.5 представлена схема заміщення ПЕМП, конструктивна схема якого відповідає рис. 2.1, а.

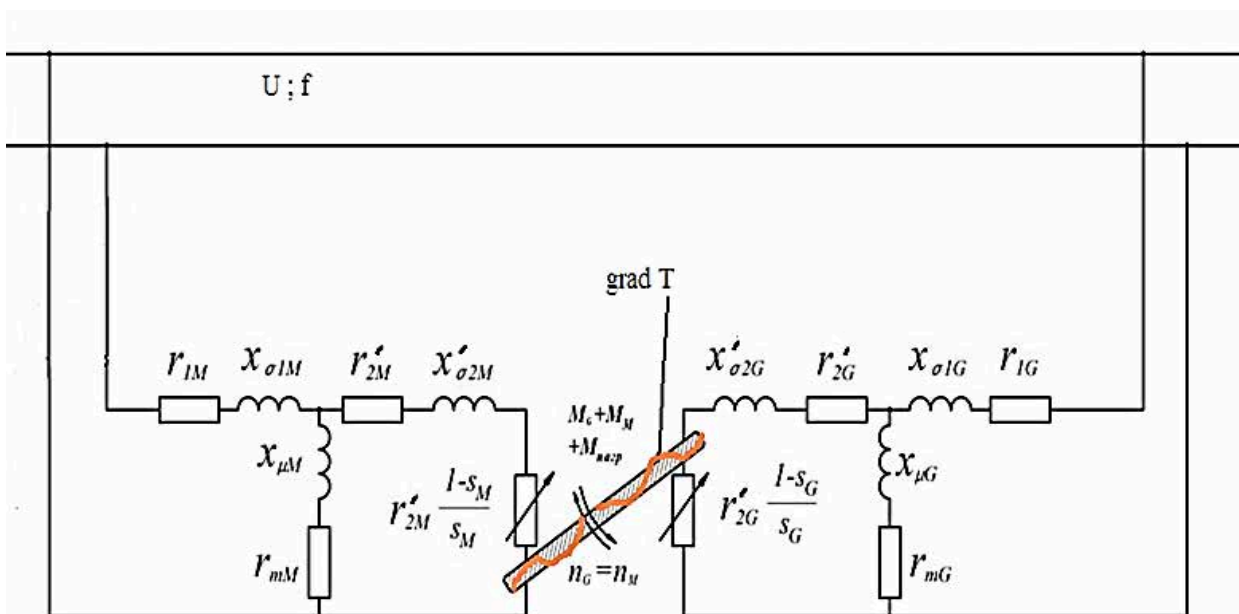


Рис.4.5. Схема заміщення ПЕМП з спільним феромагнітним ротором

На спільний феромагнітний ротор на відповідних ділянках діють електромагнітні моменти двигунового  $M_M$  і гальмівного модулей  $M_G$ , які урівноважуються моментом навантаження  $M_{load}$ . Оскільки матеріал, що переробляється, є одночасно навантажувально-охолоджувальним середовищем, то теплообмін і механічне навантаження в ДМ і ГМ взаємопов'язані.

#### 4.3. Висновки до розділу 4

У початкових умовах еквівалентна схема Т-типу для АД дає значення, найближче до результату експерименту. Оскільки умови роботи занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача в біореакторах передбачають режими великих ковзань ( $s = 0,8 - 0,9$ ), то у якості еквівалентної схеми доцільно вибрати схему Т-типу.

Основним режимом ПЕМП слід вважати зустрічне обертання полів, при якому модуль ГМ функціонує з ковзанням  $s_G > 1$ , тобто у режимі електромагнітного гальма. Для рухового модуля ПЕМП проектна потужність вибирається виходячи з суми теплової  $P_T$  і механічної  $P_{мех}$  потужностей. Для гальмівного модуля, що працює в режимі протиковчнення, - тільки теплової.

Відрізняльною особливістю розробленої схеми заміщення ПЕМП є відображення параметрів окремих модулів, а також діючих на спільний феромагнітний ротор на відповідних ділянках електромагнітних моментів двигунового  $M_M$  і гальмівного модулей  $M_G$ , які урівноважуються моментом навантаження  $M_{load}$ .

## ВИСНОВКИ

Розроблені два варіанти конструктивного виконання занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП), що виконує одночасно функції асинхронного приводу, пристрою, що переміщує, індукційного нагрівача і електромагнітного осцилятора.

У початкових умовах еквівалентна схема Т-типу для АД дає значення, найближче до результату експерименту. Оскільки умови роботи занурювального поліфункціонального електромеханічного перетворювача в біореакторах передбачають режими великих ковзань ( $s = 0,8 - 0,9$ ), то у якості еквівалентної схеми доцільно вибрати схему Т-типу.

Запропоновані методи досліджень процесів біометаногенезу під керованою дією теплового, магнітного та електричного полів і механічних коливань.

Сформовані принципові положення щодо розробки методик вимірювання потенціалів елементів іонних каналів, які можуть бути застосовані при дослідженнях процесів анаеробного бродіння з використанням електрофізичних методів впливу.

Проведення експериментів з низькочастотним магнітним полем, що обертається, формує два напрямки розвитку біогазового виробництва:

- виробництво високоякісного біогазу ( $> 50\%$  метану) шляхом стимуляції метаногенних мікроорганізмів в електромагнітних полях;
- скорочення часу ферментації та неявне підвищення енергоефективності біогазових установок

До біотропних параметрів низькочастотного магнітного поля, що обертається, визначальними біологічно значущі фізико-хімічні механізми дії фізичного фактора на субстрат слід вважати: інтенсивність магнітного поля; кругову частоту; градієнт поля; частоту та форму імпульсу; тривалість дії.

Встановлено інгібуючу дію на активність метанових бактерій високої напруженості електричного поля, що створюється електричним нагрівальним

кабелем у біосистемі реакторів, виконаних із пластику. Застосування електричного нагріву всередині та зовні біореактора допустиме за наявності екранування, яке забезпечує допустиму для колоній метанових бактерій напруженість постійного електричного поля (не більше 200 В/м).

Іншим важливим результатом досліджень є експериментальне підтвердження сприятливого впливу магнітного поля на діяльність метанових бактерій при впливі статичного магнітного поля або магнітодинамічного поля з частотою 2 Гц та періодичним перемішуванням субстрату (до трьох разів на добу).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України "Про альтернативні джерела енергії". (Редакція, що діє на момент захисту роботи, від 01.06.2025). Відомості Верховної Ради України.
2. Закон України "Про енергетичну ефективність". (Редакція, що діє на момент захисту роботи, від 01.06.2025). Відомості Верховної Ради України.
3. Постанова Кабінету Міністрів України "Деякі питання стимулювання виробництва електричної енергії з альтернативних джерел" (актуальна редакція, від 01.06.2025). Офіційний вісник України.
4. ДСТУ ISO 13686:2018. Природний газ. Класифікація якості (ISO 13686:2013, IDT).
5. Акімов, О. В., & Петров, С. Д. (2020). Вплив електричного поля на інтенсифікацію процесів анаеробного зброджування органічних відходів. *Електротехніка та енергетика*, 1(2), 45-52.
6. Васильєв, М. О., & Коваленко, І. В. (2019). Застосування ультразвукового впливу для підвищення ефективності біогазових установок. *Відновлювана енергетика*, 3(1), 67-74.
7. Гончарук, Ю. М., & Мельник, П. А. (2021). Електростимуляція мікроорганізмів у анаеробних реакторах для збільшення виходу біогазу. *Біотехнологія. Збірник наукових праць*, 14(3), 112-120.
8. Kabeyi M.J.K. "Feasibility of wellhead technology power plants for electricity generation." *Int J Comput Eng Res Trends*, 7 (2) (2020), pp. 1-16.
9. Nyamukamba P.M., Chikukwa P., Makaka E.S., G T. "Biogas upgrading approaches with special focus on siloxane removal—A review." *Energies*, 13 (6088) (2020), pp. 1-17.
10. Rivera R. "Energy conversion via a biogas fuel cell: what are the environmental & economic costs?" *Diamond Sci* (2021). [Accessed 2021].
11. Murphy D.M., Richards A.E., Colclasure A.M., Rosensteel W., Sullivan N. "Biogas fuel reforming for solid oxide fuel cells." *ECS Trans*, 35 (1) (2019), pp. 2653-2667.
12. Bhardwaj S., Das P. "A review: Advantages and disadvantages of biogas." *Int Res J Eng Technol (IRJET)*, 4 (10) (2017), pp. 890-893.
13. Li T., Tang D., Li Z., Du J., Zhou T., Jia Y. "Development and test of a Stirling engine driven by waste gases for the micro-CHP system." *Appl Therm Eng* (2012) (2012), pp. 33-34.
14. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. "Fuel from plastic wastes for sustainable energy transition." Presented at the 11th annual international conference on industrial engineering and operations management, Singapore, March 7-11, 2021 (2021).

15. Abanades S., et al. "A conceptual review of sustainable electrical power generation from biogas." *Energy Sci Eng*, 10 (2) (2021), pp. 630-655.
16. Urbonienė V. "Buildings 2020 energy sources." In: Krawczyk D.A. (Ed.), *Buildings energy sources* (2019), pp. 213-254.
17. Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology advances*, 36(2), 452-466.
18. Kougias, P.G., Campanaro, S., Treu, L., Zhu, X., Angelidaki, I., 2017a. A novel archaeal species belonging to methanoculleus genus identified via de-novo assembly and metagenomic binning process in biogas reactors. *Anaerobe* 46, 23–32.
19. Kougias, P.G., Treu, L., Benavente, D.P., Boe, K., Campanaro, S., Angelidaki, I., 2017b. Exsitu biogas upgrading and enhancement in different reactor systems. *Bioresour. Technol.* 225, 429–437.
20. Grande, C.A., Blom, R., 2014. Cryogenic adsorption of methane and carbon dioxide on zeolites 4A and 13X. *Energy Fuel* 28, 6688–6693.
21. Lu, L., & Ren, Z. J. (2016). Microbial electrolysis cells for waste biorefinery: A state of the art review. *Bioresource technology*, 215, 254-264, Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2014). Microbial electrolysis cells turning to be versatile technology: recent advances and future challenges. *Water research*, 56, 11-25.
22. Thrän, D., Schering, K., Schmieder, U., Andersson, K., Deane, P., Dotzauer, M., ... & Talluri, G. (2021). Expectation and implementation of flexible bioenergy in different countries (No. 1).
17. Geng, S., Fu, W., Chen, W., Zheng, S., Gao, Q., Wang, J., & Ge, X. (2020). Effects of an external magnetic field on microbial functional genes and metabolism of activated sludge based on metagenomic sequencing. *Scientific Reports*, 10(1), 8818.
18. Myśliwiec, D., Szcześ, A. & Chibowski, S. Influence of static magnetic field on the kinetics of calcium carbonate formation. *J. Ind. Eng. Chem.* 35, 400–407, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.01.026> (2016).
19. Zaidi, N. S., Sohaili, J., Muda, K. & Sillanpää, M. Magnetic Field Application and its Potential in Water and Wastewater Treatment Systems. *Sep. Purif. Rev.* 43, 206–240, <https://doi.org/10.1080/15422119.2013.794148> (2013).
20. Blakemore, R. Magnetotactic Bacteria. *Science* 190, 377–379, <https://doi.org/10.2307/1741081> (1975).
21. Konopacki, M. & Rakoczy, R. The analysis of rotating magnetic field as a trigger of Gram-positive and Gram-negative bacteria growth. *Biochemical Eng. J.* 141, 259–267, <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.10.026> (2019).

22. Malik, N. A., Muda, K., Zaidi, N. S., Darwish, M., & Omar@ Omri, A. H. (2020). Effect of electromagnetic field on low dissolved oxygen wastewater treatment.
23. Y.J. Chen, Q. Xue, L. Liu, Y. Kong, X.X. He, J. Ma, S. Ge, Z.M. Yuan. "Influences of magnetic powder addition on the anaerobic digestion of municipal dewatered sludge." *Environ. Prog. Sustain*, vol. 38, pp. 374–379, 2019.
24. M. Debowski, M. Zielinski, M. Kisieleska, A. Hajduk. "Effect of constant magnetic field on anaerobic digestion of algal biomass." *Environ. Technol*, vol. 37, pp. 1656–1663, 2016.
25. L.L. Liu, T. Zhang, H.W. Wan, Y.L. Chen, X.J. Wang, G.H. Yang, G.X. Ren. "Anaerobic co-digestion of animal manure and wheat straw for optimized biogas production by the addition of magnetite and zeolite." *Energy Convers. Manag.* vol. 97, pp. 132–139, 2015.
26. E. Abdelsalama, M. Samerb, Y.A. Attiaad, M.A. Abdel-Hadic, H.E. Hassana, Y. Badra. "Influence of zero valent iron nanoparticles and magnetic iron oxide nanoparticles on biogas and methane production from anaerobic digestion of manure." *Energy*, vol. 120, pp. 842–853, 2017.
27. M. Zieliński, M. Zielińska, A. Cydzik-Kwiatkowska, P. Rusanowska, M. Dębowski. "Effect of static magnetic field on microbial community during anaerobic digestion." *Bioresource Technology*, vol. 323, pp. 124600, 2021.
28. G. Beretta, A.F. Mastorgio, L. Pedrali, S. Saponaro, E. Sezenna. "The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 18(1), pp. 29-75, 2019.
29. U.G. Letuta, T.A. Tikhonova. "Magnetic Fields and Magnetic Isotope 25Mg Effects on Biofilms Formation by Bacteria E. coli." *Dokl Biochem Biophys*, vol. 484, no. 1, pp. 85 – 87, 2019.
30. A. Buchachenko. "Why magnetic and electromagnetic effects in biology are irreproducible and contradictory." *Bioelectromagnetics*, vol. 37, no. 1, pp. 1–13, 2016.
31. Y.B. Xu, X.J. Duan, J.N. Yan, Y.Y. Du, S.Y. Sun. "Influence of magnetic field on activity of given anaerobic sludge." *Biodegradation*, vol. 20, no. 6, pp. 875–883, 2009.
32. J.C. de Souza Matos, L. Rozenský, Z. Vrba, J.M. Hansen, M. Hájek, J. Lípa, S.I. Maintinguer. "Application of electromagnetic field in anaerobic biodigestion in batch reactors." *BioResources*, vol. 15, no. 3, pp. 4972-4981, 2020.
33. D. Szwarc, K. Szwarc. "Use of a Pulsed Electric Field to Improve the Biogas Potential of Maize Silage." *Energies*, vol.14, pp. 119, 2021.
34. V.M. Polishchuk, S.A. Shvorov, M.M. Zablodskiy, P.P. Kucheruk, T.S. Davidenko, Ye.O. Dvornyk. "Effectiveness of Adding Extruded Wheat Straw to Poultry Manure to Increase the Rate of Biogas Yield." *Problemele Energeticii Regionale*, vol. 51, no. 3, pp. 111-124, 2021.
35. V. Kovalenko, Yu. Kachan, O. Lapikova. "Efficiency of Application of Electric Fields in Biogas Plants at Different Temperature Modes." *Proceedings IEEE*

3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). –IEEE, 2018. pp. 286 – 290.

36. C.Mateescu,A.Caramitu,D. Marin, N. Butoi. Methanogenes Stimulation in Electric Fields for Frequencies in Range of 0,1- 500Hz. *Electrotehnika, Electronica, Automatica*,2017,vol.65,no.1, pp.67-71.

37. M. Zablodskiy, V. Savchenko, P. Klendiy, V. Pliuhin. “Intensification of Biogas Fermentation Processes in the Bioenergy System.” In 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), IEEE, 2018, pp. 39-44.

38. M. Zablodskiy, V. Kozyrskiy, A. Zhylytsov, V. Savchenko, O. Sinyavsky, M. Spodoba, P. Klendiy, G. Klendiy, “Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field.” In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv: IEEE. 2020, pp. 530-535.

39. Parameters of induction machines with a common external massive rotor. Mykola Zablodskiy ; Volodymyr Kozyrskiy ; Volodymyr Gritsyuk .// 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). Publication Year: 2017, Page(s): 108- 111 DOI: 10.1109/MEES.2017.8248863

40. Zablodskiy, M., Klendiy, P., & Gritsyuk, V. (2019, April). The Influence of a Rotating Magnetic Field on the Intensity of Methane Formation in a Bioreactor. In 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (pp. 507-511). IEEE.

41. Frodsham, G., & Pankhurst, Q. A. (2015). Biomedical applications of high gradient magnetic separation: progress towards therapeutic haemofiltration. *Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik*, 60(5), 393-404.

42. Martinac, B., Saimi, Y., & Kung, C. (2008). Ion channels in microbes. *Physiological reviews*, 88(4), 1449-1490.

43. Satter R.L., Moran N. Ionic channels in plant cell membranes II *Physiol. Plant.* -1988. V. 72, N 4. - P 816-820.

44. Hille, B. 1975. Ionic selectivity, saturation and block in sodium channels. *J. Gen. Physiol.* 66:535–560

45. Clarkson, D. T., Carvajal, M., Henzler, T., Waterhouse, R. N., Smyth, A. J., Cooke, D. T., & Steudle, E. (2000). Root hydraulic conductance: diurnal aquaporin expression and the effects of nutrient stress. *Journal of Experimental Botany*, 51(342), 61-70.

46. Lu, L., & Ren, Z. J. (2016). Microbial electrolysis cells for waste biorefinery: A state of the art review. *Bioresource technology*, 215, 254-264

47. H. Wang, J. Xu, L. Sheng, X. Liu, M. Zong, and D. Yao. “Anaerobic Digestion Technology for Methane Production Using Deer Manure Under Different Experimental Conditions,” *Energies*, vol. 12, no. 9, p. 1819, 2019.

48. Pappano V, S.E.Lyshevski, B.Friedland, (1998). Identification of Induction Motor Parameters, Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control Tampa, Florida USA.

49. IEEE Standard 112 -2017. IEEE Standard Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Febr. 2018, pp. 1-87.
50. Yoo A, Sang-hoon Lee, Young-Doo Yoon, (2015). Parameter Identification of Induction Motors at a Standstill Based on Integral Calculation, IEEE.
51. Wengerkiewicz, C. A., Elias, R. D. A., Batistela, N. J., Sadowski, N., Kuo Peng, P., Lima, S. C., ... & Beltrame, A. Y. (2017). Estimation of three-phase induction motor equivalent circuit parameters from manufacturer catalog data. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(01), 90-107.
52. Abdelhadi, B.; Benoudjit, A.; Nait-Said, N. Application of genetic algorithm with a novel adaptive scheme for the identification of induction machine parameters. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2005, 20, 284–291.
53. Bottiglieri, G.; Consoli, A.; Lipo, T.A. Modeling of saturated induction machines with injected high-frequency signals. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2007, 22, 819–828.
54. Wu, R. C., Tseng, Y. W., & Chen, C. Y. (2018). Estimating parameters of the induction machine by the polynomial regression. *Applied Sciences*, 8(7), 1073.
55. Lin, W. M., Su, T. J., Wu, R. C., & Chiang, C. T. (2009, July). Fast analysis for power parameters by the Newton method. In 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (pp. 1868-1872). IEEE.
56. Salimin RH, Siti Hajar, Shah Rizam, Faridah Ismail, (2013). Parameter Identification of Three-Phase Induction Motor using MATLAB-Simulink, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOC02013). Langkawi. Malaysia. 3-4 June 2013
57. Anthony, Z., Erhaneli, E., & Busran, B. (2017). A new equivalent circuit of the three-phase induction motor (case studies: Current and power factor of the motor). *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 12(23), 6967-6974.
58. Tezcan, M. M., Yetgin, A. G., Canakoglu, A. I., Cevher, B., Turan, M., & Ayaz, M. (2018). Investigation of the effects of the equivalent circuit parameters on induction motor torque using three different equivalent circuit models. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 157, p. 01019). EDP Sciences.
59. Бешта, О. С., Балахонцев, О. В., Михайленко, О. В., Худолий, С. С., & Худий, Є. Г. (2007). Ідентифікація параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна в пакетному режимі. In XIV Міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". Сбірник наукових праць ДДТУ (pp. 472-475).
60. Patent United States US 201200383 03A1. Application Publication Apparatus And Method For Sensorless Identification Of Rotating Electrical Equivalent Circuit Parameters Of A Three-Phase Asynchronous Motor. Pub. No.: US 2012/0038303 A1.

