

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 636.5252/58:62 503.51

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ННІ енергетики, автоматики і  
енергозбереження  
(назва ННІ)

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри автоматики  
та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_ В.В. Каплун  
(підпис) (ПІБ)

2024 р.

\_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

2.06.-КМР.1664"С".2024.09.26.001.ПЗ

на тему «**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО  
КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СЕРЕДОВИЩА В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ**»

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(назва)

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_ І.М. Болбот, д.т.н., професор  
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав \_\_\_\_\_ О.О. Король  
(підпис) (П.І.Б студента)

Керівники магістерської роботи \_\_\_\_\_ Т. І. Лендел, к.т.н., доц.  
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

**КИЇВ-2024**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
автоматики та робототехнічних  
систем ім. акад. І.І. Мартиненка

\_\_\_\_\_ О.О. Опришко

р.

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

(бакалаврської, дипломної)

**Королю Олександрю Олександровичу**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тема кваліфікаційної магістерської роботи « **ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СЕРЕДОВИЩА В БІОГАЗОВІЙ  
УСТАНОВЦІ**»,

затверджена наказом ректора НУБіП України від 14.12.2023 року № 2268«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.11.2024 року

**Вихідні дані до магістерської роботи:** завдання кафедри на виконання  
магістерської роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації;  
матеріали дослідження та аналізу; наукова література з тематики магістерської  
роботи.

**Перелік питань, що підлягають дослідженню:**

1. Аналіз технологічного процесу отримання біогазу.
2. Дослідження біогазової установки як об'єкта автоматичного керування.
3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.  
Розробка цифрової системи керування.
5. Схеми системи автоматизації.
6. Розробка засобів візуалізації процесу керування біогазовою установкою.  
Техніко-економічне обґрунтування.

Техніко-економічне обґрунтування.

**Дата видачі завдання «15» грудня 2023 року**

**Керівник магістерської роботи** \_\_\_\_\_

(Підпис)

Лендел Т.І.

(Прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_

(Підпис)

Король О.О.

(Прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Дипломна робота присвячена розробці автоматизованої системи управління температурним режимом у біогазовій установці. Температура є одним із ключових факторів, що впливає на ефективність анаеробного збродження органічних відходів для отримання біогазу. Оптимізація цього процесу дозволяє підвищити вихід біогазу, зменшити енергетичні витрати та забезпечити стабільність роботи реактора.

У роботі розглядаються питання автоматизації нагріву та підтримання рівномірного температурного режиму в біогазовому реакторі. Для цього запропоновано використання мікроконтролерів, таких як Raspberry Pi та Arduino, у поєднанні із сенсорами температури та системами нагрівання. Розроблена система дозволяє в режимі реального часу контролювати температуру субстрату, автоматично регулювати нагрівальні елементи та забезпечувати енергоефективність процесу.

Результати роботи включають проект SCADA-системи для моніторингу та управління процесом, а також рекомендації щодо підвищення ефективності автоматизації температурного режиму. Практична значущість дослідження полягає у можливості впровадження розробленої системи для модернізації існуючих біогазових установок та створення нових рішень з автоматизованим контролем.

Дипломна робота містить теоретичний аналіз, технічні рішення, результати експериментів і пропозиції щодо впровадження автоматизованої системи у практичну діяльність.

<b>Перелік умовних позначень і скорочень .....</b>	<b>5</b>
<b>Вступ .....</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ</b>	
1.1. Методи та основні операції при забезпеченні технологічного процесу .....	9
1.2. Інформаційний аналіз об'єкта керування .....	11
1.3. Розробка функціональної схеми автоматизації .....	15
<b>РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ</b>	
2.1. Дослідження об'єкта керування як системи .....	22
<b>РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ</b>	
3.1. Вибір алгоритму керування .....	32
<b>РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТА</b>	
4.1. Вибір технічних засобів .....	37
4.2. Цифрова система керування .....	43
4.2.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК .....	45
4.2.2. Дослідження цифрового регулятора .....	46
4.3. Дослідження системи на стійкість та якість .....	48
4.4. Вибір пускозахисної апаратури .....	50
4.5. Розробка принципової схеми .....	53
4.6. Розробка щита управління .....	57
<b>РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ</b>	
5.1. Розрахунок техніко-економічної ефективності автоматизації систем керування технологічними процесами у сільськогосподарському виробництві .....	63
<b>Висновки .....</b>	<b>80</b>
<b>Список використаних джерел .....</b>	<b>71</b>
<b>Додатки .....</b>	<b>74</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

**АСК** – автоматизована система керування

**БГУ** – біогазова установка

**ПЛК** – програмований логічний контролер

**ЦСК** – цифрова система керування

**САК** – система автоматичного керування

**ПІД** – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

**ТП** – технологічний процес

**КУ** – керуючий орган

**СКАДА** – система диспетчерського управління та збору даних (англ. Supervisory)

**ОДК** – об'єкт дистанційного контролю

**ЕП** – енергетичні показники

**ТЕО** – техніко-економічне обґрунтування

**ТМ** – технологічні можливості

**АП** – автоматизація процесів

## Вступ

Біогазові технології займають важливе місце у формуванні сучасної енергетичної системи, тому їх енергетична ефективність привертає дедалі більше уваги.

Розширення фермерських і сільськогосподарських угідь, а також збільшення поголів'я тварин спричиняють накопичення біомаси у вигляді рослинних і тваринних відходів. Це змушує шукати альтернативні методи утилізації, оскільки традиційні системи зберігання є джерелами небезпечних викидів метану та оксидів азоту, що сприяє забрудненню повітря, зміні клімату та посиленню парникового ефекту. Одним із найбільш ефективних підходів до утилізації відходів є аеробна та анаеробна обробка у спеціалізованих резервуарах – біогазових реакторах.

**Актуальність теми.** Сьогодні зброджування органічних відходів у біогазових установках є одним із найперспективніших, екологічно чистих та економічно вигідних способів отримання енергії з відходів у вигляді біогазу. До того ж, анаеробне зброджування дає можливість отримати екологічно безпечні добрива як побічний продукт.

Біогаз, отриманий у результаті анаеробної обробки органічних відходів, може бути очищений до біометану, який замінює природний газ і використовується для власних потреб або для виробництва теплової та електричної енергії у когенераційних установках.

Ефективність використання біогазових установок значною мірою залежить від енергоефективності процесів, зокрема інтенсифікації анаеробного зброджування. Особлива увага приділяється вибору пристроїв для перемішування та нагрівання, оскільки їх енергетичні витрати залежать від багатьох факторів. У зв'язку з цим у світі проводиться велика кількість наукових досліджень, спрямованих на створення енергоефективних конструкцій для перемішування та підігріву органічних відходів у біогазових реакторах.

Україна, як і багато інших країн, має значні ресурси для виробництва біогазу, зокрема сільськогосподарські та природні. Проте відсутність ґрунтовних теоретичних і експериментальних досліджень щодо технологічних та енергетичних аспектів перемішування та нагрівання субстрату у біогазових реакторах уповільнює розробку нових енергоефективних конструкцій.

Таким чином, дослідження технологічних і енергетичних аспектів впливу процесів перемішування та нагрівання субстрату на зниження енергетичних витрат є актуальним завданням. Це сприятиме створенню конструкцій, які забезпечують енергоефективне перемішування та рівномірний температурний режим під час анаеробного зброджування субстрату у біогазових реакторах.

## **етоди та основні операції при забезпеченні технологічного процесу**

### **ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ**

#### **1.1. Особливості процесу генерації біогазу**

1.1.1 Стадії розкладу біомаси. Біогаз є продуктом роботи мікроорганізмів, який утворюється внаслідок розкладання ними органічного субстрату. Процес розкладання можна розділити на чотири етапи, в кожному

з яких участь беруть багато різних груп мікроорганізмів.

I. На першому етапі аеробні бактерії переробляють високомолекулярні органічні субстанції (білок, вуглеводи, жири, целюлозу) за допомогою ензимів на низькомолекулярні з'єднання, такі як цукор, амінокислоти, жирні кислоти і воду. Ензими, виділені гідролізними мікроорганізмами, прикріплюються до зовнішньої стінки мікроорганізмів (так звані екзоферменти) і при цьому розщеплюють органічні складові субстрату на малі водорозчинні молекули. Полімери (багатомолекулярні утворення) перетворюються на одномери (окремі молекули). Цей процес, що отримав назву гідроліз, проходить повільно і залежить від позаклітинних ензимів, як

наприклад целюлоза, амілази і ліпази. На процес впливає рівень рН (4,5-6) і час перебування в ферментаторі. Розщеплення органіки на окремі складові і перетворення її на метан може проходити лише у вологому середовищі, оскільки мікроорганізми можуть переробляти тільки речовини в розчиненому вигляді. Таким чином, для бродіння твердих субстратів існує потреба у воді.

II. Далі розщепленням займаються кислотоутворюючі мікроорганізми.

Окремі молекули проникають в клітини мікроорганізмів, де вони продовжують розкладатися. У цьому процесі частково беруть участь аеробні

мікроорганізми, що споживають залишки кисню, створюючи при цьому необхідні для метанових мікроорганізмів анаеробні умови. При рівні рН 6-

виробляються в першу чергу нестійкі жирні кислоти (оцтова, мурашина, масляна, пропіонова), низькомолекулярні алкоголи (етанол і гази – двоокис вуглецю, вуглець, сірководень і аміак). Цей етап називають фазою окислення. Перші перетворення органіки відбуваються на протязі від декількох годин до 2 днів. У ідеальному випадку між фазами розщеплення встановлюється динамічна рівновага в концентрації речовин, а саме між надходженням живильних речовин і їх розщепленням. Дуже важливим аспектом даного етапу є не допущення перегадування мікроорганізмів швидкорозщеплювальним субстратом, що приводить до накопичення кислот

із-за кислотоутворюючих мікроорганізмів. У зв'язку з цим може наступити дуже різке падіння рН, якого не переживуть інші мікроорганізми.

III. Після цього кислотоутворюючі бактерії з органічних кислот створюють початкові продукти для утворення метану: оцтову і мурашину кислоту, вуглекислий газ, водень. Такі мікроорганізми, що знижують

кількість вуглецю є дуже чутливими до температури.

IV. На останньому етапі за допомогою метаноутворюючих мікроорганізмів з оцтової і мурашиної кислот, вуглецю і водню утворюється

метан, вуглекислий газ і вода. 90% всього метану виробляється на цьому етапі, причому 70% метану утворюється з оцтової кислоти. Таким чином, утворення оцтової кислоти (тобто III етап розщеплення) є чинником, що визначає швидкість утворення метану. Метанові мікроорганізми виключно анаеробні. Оптимальний рівень рН складає 7.

В процесі розщеплення продукти обміну речовин кожної групи мікроорганізмів виступають живильними речовинами для наступної групи мікроорганізмів. Пофазне розщеплення органіки відбувається не з однаковою

швидкістю. Різні групи мікроорганізмів працюють з різною швидкістю.

Чим

складніша структура субстрату, тим довше триває розщеплення.

Кількість виробленого щодня біогазу росте до того моменту, поки не буде досягнуто максимум. На момент досягнення кульмінаційного моменту

субстрат, який легко розкладається, буде перероблений і мікроорганізмам залишаться лише речовини, які важко перетравлювати. Таким чином, кількість газу, що виробляється, знижуватиметься до тих пір, поки не буде розщеплений весь доступний матеріал або поки субстрат не можна буде розщеплювати далі. Такий процес утворення біогазу схожий на так званий періодичний метод.

Сьогодні прийнято використовувати поступовий процес, при якому субстрат подається протягом дня багатьма невеликими порціями, що в свою

чергу веде до рівномірного виробництва біогазу. Швидко розщеплювальний

субстрат має схильність до окислення, тому рекомендується для гідролізу і окислення передбачити окремий резервуар, щоб з нього продукти розкладання дозовано подавати у ферментатор (двоступінчата технологія). Перевагою є витримка ефективності роботи мікроорганізмів через створення оптимальних умов життєдіяльності (в першу чергу рівень рН). Таким чином можна досягти більшого виробництва біогазу.

1.1.2 Температурний вплив на інтенсивність процесу. Метанові мікроорганізми проявляють свою життєдіяльність в межах температури °С. Якщо температура вища, вони починають гинути, за винятком кількох штамів, які можуть жити при температурі середовища до 90 °С.

При мінусовій температурі вони виживають, але припиняють свою життєдіяльність.

Принципово важливим є те, що чим вища температура, тим швидше відбувається розкладання і виробництво газу, але разом з тим знижується вміст метану в біогазі. Це пов'язано з інтенсивнішим розчиненням в субстраті

двоокису вуглецю, який переходить в газоподібну фазу, знижуючи відносний вміст метану в біогазі.

Існує три типові температурні режими, в яких себе добре відчують відповідні штами мікроорганізмів:

- психрофільні штами при температурі нижче 25 °С;
- мезофільні штами при температурі 25-45 °С;
- термофільні штами при температурі понад 45 °С. Установки, що працюють на поновлюваній сировині, при великій кількості субстрату, що легко переробляється, приводить до необоротних

реакцій окислення з відповідним виділенням тепла. Таким чином при бродінні кукурудзи спостерігалось зростання температури. Такий ефект звичайно ж знижує споживання тепла установкою і повинен спостерігатися

для кожної установки окремо і бути врахований специфікою установки.

Робота при високих температурах вимагає спеціальних систем автоматизації і точного керування роботою біогазової установки. В наш час,

коли йдеться про повну інтеграцію біогазових установок в повсякденну роботу сільськогосподарського підприємства, мезофільний режим створює менше складнощів.

1.1.3 Характеристика кислотного середовища. В той час, як гідролізуючі і кислотоутворюючі мікроорганізми в кислому середовищі з рівнем рН 4,5-6,3 досягають оптимуму своєї активності, мікроорганізми, які

утворюють оцтову кислоту і метан, можуть жити тільки при нейтральному або слаболужному рівні рН 6,8-8. Якщо рівень рН перевищує оптимальне значення, відбувається зниження життєдіяльності, при якому мікроорганізми

стають повільнішими, що уповільнює утворення біогазу. Для одноступінчатих технологій слід витримувати рівень рН для метаноутворення (оптимум 7). На рівень рН можна впливати кількістю субстрату, що додається, і його видом. Субстрати, які швидко окислюються призводять до різкого падіння рівня рН; тому їх слід додавати в обмеженій кількості і поступово. При використанні гною як основного виду сировини великі коливання рівня рН не спостерігаються.

Мікроорганізми, для утворення своїх клітин вимагають живильних речовин, вітамінів, розчинних з'єднань азоту, мінеральних речовин і мікроелементів. Ці речовини в потрібній кількості містяться в рідкому і

твердому гної. Достатня їх кількість міститься також в силосі кукурудзи та сіні, що дозволяє їм бродити в чистому вигляді без додавання інших субстратів. Як орієнтоване значення для змішування субстратів можна взяти

такі співвідношення живильних речовин: C:N:P = 75:5:1 або 125:5:1; C:N = 10:1 або 30:1; N:P = 5:1.

Співвідношення C:N показує загальне співвідношення вуглеводів із загальним вмістом азоту. На один відсоток фосфору припадають 5 відсотків

азоту і 75-125 відсотків вуглецю. Оптимальне співвідношення вуглецю до азоту становить 30:1 і 10:1. Для кожного виду субстрату або суміші субстратів можна провести розрахунок співвідношень речовин (табл. 1.1). Для першої оцінки суміші субстратів має сенс провести такий розрахунок.

З

його допомогою своєчасно можна визначити можливу затримку процесу розвитку через дуже велику концентрацію азоту. Для оптимальної життєдіяльності мікроорганізмів також є необхідність в невеликій кількості

важких металів і мікроелементів. В той же час важкі метали можуть мати стримуючий або навіть токсичний вплив. Нікель, кобальт, молібден, вольфрам і залізо є особливо необхідними мікроорганізмам для утворення ензимів. Розрахунки співвідношення C: N: P суміші на прикладі 1 відсотка гною

худоби і 0,7 відсотка силосної кукурудзи.

Вміст корисних речовин в суміші  $C = (K_C \cdot K_C\%) + (G_X \cdot G_X\%) / (G_X\% + K_C\%)$ .

З прикладу виходить  $C = (96 \cdot 0,7) + (40 \cdot 1) / (0,7 + 40) = (67,2 + 40) / 40,7 = 63\%$ .

Аналогічно розраховуються також вміст N і P<sub>205</sub>. 1.1.4 Вплив супутніх речовин на досліджуваний процес.

1. Кисень може проникнути з недостатньо збагаченим подрібненим

субстратом і шкодити метановим мікроорганізмам.

2. Антибіотики, хіміотерапевтичні та дезінфікуючі засоби можуть стримувати процес бродіння і привести до його повної зупинки, особливо при їх високій концентрації. Це може статися, якщо з усім поголів'ям або одночасно всі хліва почали дезінфікувати. У такому випадку уникнути проблеми допоможе байпасна лінія, що веде з хліва прямо в ємність для зберігання. Препарати, які застосовуються до окремих тварин, як правило, не мають настільки негативних наслідків. Між вживаними засобами також існує велика різниця. Табл. 1.2 показує, що є речовини, що не шкодять навіть у великій концентрації, тоді як інші чинять негативний вплив вже в малій концентрації.

3. Органічні кислоти, карбонові кислоти, жирні кислоти. Стримуючий вплив надає також накопичення органічних кислот, які утворюються при анаеробному розкладанні органіки. Співвідношення органічних кислот, званих також летючими жирними кислотами, дає нам інформацію про стан процесу. При стабільному процесі утворення біогазу сума органічних кислот

(їх також називають еквівалентами оцтової кислоти) нижче 2000 мг/л.

Внаслідок занадто швидкої подачі свіжих або субстратів, які дуже легко розкладаються, може відбутися швидке окислення і накопичення кислот до рівня 16 000 мг/л. Крім того відбудеться негативна зміна співвідношення оцтової кислоти до пропіонової кислоти. Якщо рівень перевищує 3000 мл/л, а

для пропіонової кислоти 300 мл/л, відбудеться порушення процесу.

Накопичення кислот призводить до цілого ряду реакцій, починаючи з того, що великі концентрації кислот стримують самі мікроорганізми таким чином, що знижується рівень рН, що і викликає затримку розвитку метанових мікроорганізмів до повної зупинки процесу розкладання.

Протидіяти цьому можна лише повним скороченням подачі субстрату. З практики годування жуйних тварин відомо, що для перетравлення їжі співвідношення оцтова кислота: пропіонова кислота має становити 3:1. Як правило, цього досягають, коли вміст сирих волокон в раціоні сухої маси досягає 18-20%. Якщо це співвідношення не досягається, то у жуйних тварин

починається рубцевий ацидоз, а в біогазових установках це призводить до затримки розвитку бактерій і надмірного окислення. Сірководень. При розкладанні сірковмісних субстратів (переважно білки) утворюється високотоксичний, практично для всіх живих істот, сірководень ( $H_2S$ ). Вже при концентрації нижче 0,0001 його можна ідентифікувати через неприємний запах тухлих яєць, якщо ж концентрація перевищує вищезазначану, то запах зникає, але газ залишається високотоксичним. Чим нижче рівень рН, тим вище відсоток  $H_2S$  в субстраті і

біогазі. Якщо вміст  $H_2S$  в газі перевищує 50 мг в розчині, то варто очікувати

затримки розвитку мікроорганізмів. Ризик тим менше, чим вищий вміст розщеплюваних вуглецевих сполук у субстраті (ефект розбавлення). У сірковмісних субстратах можуть з'являтися мікроорганізми, які використовують водень для утворення сірководню. Вони будуть конкурувати

з метановими мікроорганізмами за водень.

5. Аміак. Унаслідок анаеробного розкладання азотовмісних субстратів (багаті на протеїн субстрати, якими, наприклад, є конюшина або пташиний послід) утворюється аміак ( $NH_4$ ). Виходячи з того, що близько 50-60% від загального вмісту азоту зберігається в перебродженому субстраті у вигляді амонію-азоту, він у свою чергу перебуває у співвідношенні з аміаком, який є

сильною отрутою. Його гострий запах неможливо сплутати з будь-яким

іншим. В цьому випадку зміни на користь отруйного амонію залежать від рівня рН і температури субстрату. Якщо рівень рН високий і температура висока, то баланс змінюється в бік аміаку. При підвищенні рівня рН = 9, співвідношення також змінюється. Крім цього, через додавання вуглеводів у

формі волокномісного матеріалу доповнюється співвідношення C/N і таким

чином протидіють затримкам. Також зменшення кількості субстрату має ефект розбавлення і зменшує тим самим навантаження. Пониження температури в ферментаторі також призводить до зниження токсичності. У разі повторної подачі перебродженого матеріалу ризик отруєння аміаком зростає. Переброджений матеріал відрізняється невеликим співвідношенням

C/N, тим самим ефект токсичності посилюється. 1.2.1 Склад біогазу.

Оскільки тільки метан дає енергію з біогазу, доцільно, для опису якості газу, виходу газу та кількості газу все відносити до метану, з його нормованими показниками. Обсяг газів залежить від температури і тиску. Високі температури призводять до розтягування газу і до зменшення разом з об'ємом рівня калорійності і навпаки. Крім того, при зростанні вологості калорійність газу також знижується. Щоб вихід газу можна було порівняти між собою, необхідно їх співвідносити з нормальним

станом (температура 0 °C, атмосферний тиск 1,01325 бар, відносна вологість

газу 0%). В цілому, дані про виробництво газу виражають у літрах (л) або м

метану на кг органічної сухої речовини (ОСР), це набагато точніше і красномовніше, ніж дані в м

3 біогазу в м

3 свіжого субстрату. У минулому не

завжди звертали увагу на цей взаємозв'язок, що призвело до малої придатності старих даних про виробництво газу, в них просто відсутні дані про температуру, атмосферний тиск, вміст метану, вміст сухої речовини і органічної сухої речовини. Навіть в лабораторних умовах при дослідженні однакових субстратів виходять різні результати по виробництву газу.

Причина цього криється в різних методах, за допомогою яких проводилися такі виміри в лабораторії. Одні робили вимірювання для свіжого субстрату, інші для сухого, одні з матеріалом, що силосується, інші з несилосованим,

в резервуарах від 0,5 літрів до 10 літрів. Якість біогазу визначається, в першу

чергу, вмістом метану або співвідношенням горючого метану ( $\text{CH}_4$ ) до «даремного» двоокису вуглецю ( $\text{CO}_2$ ). Двоокис вуглецю розбавляє біогаз і викликає втрати при його зберіганні. Тому важливо прагнути до високого вмісту метану і якомога низького вмісту двоокису вуглецю. Досягається зазвичай вміст метану близько між 50-75%. Як правило, вміст  $\text{CO}_2$  вимірюють за допомогою приладу «Brigon» і після вирахування невеликої кількості інших газів (2-8%) обчислюють вміст  $\text{CH}_4$ . Вміст метану в біогазі, в першу чергу, визначається наступними критеріями:

- Ведення процесу: у той час як в одноступінчатих біогазових установках весь процес анаеробного розкладання відбувається в одному ферментаторі, одним етапом, і таким чином весь газ виділяється як суміш газів, в двоступеневих установках, вироблений на першому етапі газ, складається у великій мірі з двоокису вуглецю і інших енергетично малоцінних газів, які виводяться в навколишнє середовище. Вироблений на

другому етапі газ має високий відсоток вмісту метану, який може складати більше 80% [1].

- Склад живильних речовин субстрату. Кількість і якість виробленого біогазу залежить від кількості внесених речовин та їх складу. Протеїни і жири мають вищий вміст метану. Для багатих на вуглеводи субстратів, як наприклад кукурудза, можна розраховувати на вміст метану в середньому

- Температура субстрату: на практиці виявилось, що при високій температурі ферментатора вихід метану гірший, ніж при низьких температурах. Це відбувається через відмінності в розчинності і утворенням

газоподібного двоокису вуглецю. Чим більша кількість CO<sub>2</sub> перейде в газоподібну форму, тим меншою буде відсоткова частка CH<sub>4</sub> в біогазі. Після метану і двоокису вуглецю, сірководень (H<sub>2</sub>S) є найважливішою складовою газу. Сірководень дуже агресивний і викликає корозію, що, в першу чергу, викликає проблеми з арматурою, газовими лічильниками, пальниками і двигунами. Тому необхідно очищати біогаз від сірки.

Очищений від сірки біогаз майже не має запаху.

Крім того, в біогазі містяться сліди аміаку, елементарного азоту, водню і кисню загальним вмістом від 6 до 8%. Сірководень і аміак можна легко заміряти за допомогою трубки Дрегера. Такі трубки можна використовувати

багаторазово. Газ, який щойно надійшов з біогазової установки насичений водяною парою. Можливо, що пара містить також сліди ще малодосліджених розчинених речовин, здатних викликати проблеми при спалюванні біогазу в

котлах та двигунах. Сушка біогазу конденсацію є дуже важливим кроком по

збагаченню газу. За допомогою конденсованої води сепарують також велику

кількість аміаку, що міститься в біогазі, і викликає великі пошкодження двигуна, особливо на підшипниках з кольорових металів.

Біогаз – це продукт метанового зброджування органічної сировини (ферментації) і може утворюватися, як в природних, так і в штучних умовах.

Проте з техніко-економічної точки зору, виробництво біогазу в штучних системах є кращим і найбільш зручним методом.

В середині метантенка, у субстраті, працюють бактерії не метаногени і метаногени. Не метаногени за нормальних умов можуть розвиватися при кислотності (рН) 5,0-8,5 в температурному діапазоні 25-42 °С. Ідеальними умовами для метаногенів є рН 6,5-7,5 і температурний діапазон 25-35 °С

Анаеробні мікроорганізми класу метаногенів не можуть розмножуватись при вологості субстрату менше 50%. Швидкість процесу ферментації залежить від температури навколишнього середовища.

Закономірність проста: чим вища температура, тим швидше іде переробка, і як результат, більша кількість одержаного газу.

Процес ферментації проходить одночасно чотири фази. Перша фаза – гідроліз, коли різні мікроорганізми (не метаногени) переробляють високомолекулярні речовини (білок, жири, вуглеводи, целюлоза) за допомогою ферментів у такі низькомолекулярні речовини як моносахариди,

амінокислоти, жирні кислоти, воду. Друга фаза – переробка сировини за допомогою мікроорганізмів, які перетворюють амінокислоти у органічні кислоти, вуглекислий газ (діоксин вуглецю), сірководень і аміак. Третя фаза

– ці сполуки ацетокислотні мікроорганізми перетворюють у ацетати, вуглекислий газ і водень. Четверта фаза – метаногени з вуглекислого газу і води у лужному середовищі виробляють метан, який є продуктом обміну

речовин в них [3].

За хімічним складом біогаз, який одержують в реакторах, близький до природного. Біогаз: метан ( $\text{CH}_4$ ) – 65-70%, вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) – до

природний газ: метан – 80-90%, вуглекислий газ – до 10%.

Найпоширенішими шкідливими домішками в біогазі крім діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) є сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) – 1,2%, азот ( $\text{N}_2$ ) – 0,1%, водень ( $\text{H}_2$ ) – 0,1%, сліди моноокисів вуглецю ( $\text{CO}$ ) та кисню ( $\text{O}_2$ ). Кількість  $\text{H}_2\text{S}$

коливається від відсотків до десятих часток відсотка залежно від джерела: каналізаційних стоків, смітника побутових відходів, біореактора для анаеробної переробки тваринницьких відходів та ін. В Україні діють технічні

умови на біогаз метантенків та біогазових реакторів з утилізації органічних

відходів, які вимагають зниження вмісту  $\text{H}_2\text{S}$  до 0,2 г/м

Сірководень – безбарвний газ з характерним запахом. Порівняно з повітрям, сірководень трохи важчий, зріджується при  $-60,8\text{ }^\circ\text{C}$ , твердне при

$-85,7\text{ }^\circ\text{C}$ . На повітрі сірководень горить з утворенням діоксиду сірки і води.

Діоксид вуглецю – це кислотний оксид, який обмежено розчиняється у воді і добре взаємодіє з лугами, розчинами солей, що мають лужні властивості, карбонатами натрію і калію, органічними сполуками, що включають гідроксильні групи (етаноли), і при зниженій температурі і підвищеному тиску добре розчиняються в спиртах (метанолі, ацетоні й інших

органічних розчинниках).

За теплою згоряння 1 м

3 біогазу еквівалентний: 0,8 м

3 природного

газу; 0,7 кг мазуту; 0,6 кг бензину; 0,85 л спирту; 1,6 кг дров; 1,4 кВт електроенергії (табл. 4.6).

Біогаз горить блакитним полум'ям (температура займання +650+750 °С). Він має теплову здатність 5000-8000 ккал/м

. Величина теплотворної

здатності прямо пропорційна вмісту метану, який, у свою чергу, залежить від

сировини, що використовується для одержання біогазу.

За визначенням, одна ккал – це тепло, потрібне для того, щоб підняти температуру 1 кг (літра) води на один градус. Отже, корисне тепло, що міститься в одному кубометрі біогазу, є достатнім для доведення до кипіння

100 кг (літрів) води з початковою температурою 20 °С або забезпечення протягом 4-5 годин горіння лампи потужністю 60-100 Вт. У порівнянні з іншими газами для займання біогазу потрібно менше

повітря. Для повного згоряння 1 літру біогазу необхідно близько 5,7 літрів повітря, в той час як для бутану – 30,9 літра і для пропану – 23,8 літра, які володіють теплотворною здібністю майже в 3 рази вище, ніж біогаз, і дають в

2 рази більше полум'я.

Біогаз – нетоксичний, безбарвний, не має запаху. Проте, в разі наявності малої кількості сірководню, він може мати слабкий запах тухлих яєць. Цей запах завжди відсутній в разі його спалювання. Із-за наявності великої кількості вуглекислого газу біогаз є вибухобезпечним паливом для

застосування.

Біогаз використовують не тільки як паливо, а й у вигляді основних чистих компонентів (метану і діоксиду вуглецю), що значно підвищує економічну цінність цього нетрадиційного джерела енергії, поліпшує екологічну ситуацію та дозволяє отримати цінні органічні добрива. Метан використовують, як паливо, а діоксид вуглецю – як інертний газ, для зварювання, заправлення вогнегасників, у харчовій промисловості, як «добриво» для тепличних господарств. Таким чином, біогаз можна використовувати як природний газ, накопичувати, перекачувати, виробляти з нього електроенергію, використовувати як паливо для двигунів внутрішнього згорання.

1.2.2 Генерація супутніх продуктів. Принципово всі органічні речовини можна хоча б частково розкласти як аеробним, так і анаеробним шляхом.

Принциповим правилом є: тверді, з складною структурою, матеріали як деревина і солома краще підходять для аеробних умов, тобто компостування,

тоді як текучі, рідкі матеріали – гній, відходи продуктів харчування, жири і т.д. краще розкладаються в анаеробних умовах, тобто при бродінні. При цьому вміст сухої речовини, в першу чергу, є вирішальним, яким методом (бродіння або компостування) їх краще всього переробляти. В цілому можна

сказати, що для мокрого методу, краще щоб вміст сухої речовини був 5-

Якщо вміст сухого субстрату менше ніж 5%, то процеси також відбуватимуться, але буде необхідність «марного» додавання дуже великої кількості води, що суттєво впливатиме на рентабельність. 15% вмісту сухого

субстрату є верхньою межею, при якій субстрат ще можна, перекачувати

насосом, перемішувати або змішувати. Сухий метод розрахований на сипучі матеріали з вмістом сухої речовини понад 25%. Вміст сухої речовини найкраще придатний до компостування матеріалу складає від 40 до 60%. Важливим, як і раніше, є співвідношення вуглецю і азоту (співвідношення C:N), яке має становити від 10:1 до 40:1. Відходи сільськогосподарських тварин створюють гарні умови як для анаеробного, так і для аеробного бродіння, оскільки вони мають збалансований склад живильних речовин і великий буферний потенціал. При складанні раціону, важливо щоб завантаження ферментатора було як мінімум менше 4 кг, ще краще, якщо менше 3 кг орган. SP/м

, незалежно від виду субстрату або його суміші [4].

При сільськогосподарському виробництві біогазу за останні роки відбулися великі зміни у видах використовуваних субстратів. Зараз на практиці рідко буває, щоб використовували виключно рідкий або твердий гній. Лише деякі великі підприємства в східній Німеччині обслуговують біогазові установки, що працюють виключно на рідкому гної. Більшість установок для своєї роботи використовують силос із рослин, залишки зерна і силос із сіна, іноді працюють взагалі без гною.

Крім великого виходу газу та великого ступеня розкладання, енергетичні рослини завдяки підтримці з боку законодавства про поновлювані джерела енергії ЄС набули особливого значення.

Використання стоків для біогазової установки, з одного боку, цікаве для багатьох фермерів, адже так вони можуть економити на дорогому підключенні каналізації; але, з іншого боку, вміст сухої речовини в стоках, як

правило, нижче 2%, таким чином доводиться шукати інші субстрати з достатнім вмістом сухої речовини. У таких випадках доводиться також

відмовитися від використання агресивних миючих і очищуючих хімічних засобів.

Суміш, що складається з безлічі різних субстратів, в залежності від виду субстратів, має дуже різні характеристики по розшаруванню. Це, в свою чергу, впливає на осідання і утворення плаваючої кірки і повинно враховуватися при виборі мішалки (техніки та її потужності). Гомогенна суміш з невеликим розміром частинок і високим вмістом СР, якою, наприклад, є гній великої рогатої худоби, перемішаний з рослинними елементами, має невелику схильність до розшарування.

1.3 Характеристика досліджуваної лінії на сучасних переробних підприємствах по виробництву біогазу та органічних біодобрих  
Для забезпечення механізованого виробництва, типове устаткування відповідно до двохстадійного проточного методу представлено у вигляді машинно-апаратної схеми. Дана комплексно-механізована лінія (рис.

дає загальне уявлення про послідовність окремих стадій і робочих операцій процесу виробництва органічних біодобрих, та біогазу з подальшим використанням його як сировини для когенераційної установки виробництва електроенергії та тепла. В ній охоплюється весь цикл етапів і операцій – від прийому сировини і до одержання готової продукції [5-8].

1.3.1 Опис технологічної схеми біогазової установки. Біогазова установка призначена для підготування вихідної біомаси (здрібнювання, гомогенізація, нагрівання) до бродіння, аеробного (кислотного) бродіння і, нарешті, анаеробного (метанового) бродіння. Також до складу біогазової установки може входити енергетичний блок.

Вихідна біомаса, що одержується щодня на фермі утримання великої рогатої худоби вологістю 80-95%, доставляється на комплекс безпосередньо або автотранспортом в цистернах, звідки фекальним насосом 1 з відповідним подрібненням довговолокнистих включень перекачується в приймальний резервуар 2, де відбувається тимчасове зберігання і стабілізація початкової біомаси – субстрату. Паралельно в процесі завантаження приймального резервуару додається 30% силосу кукурудзи, який доставляється зі сховища відходів трактором і також завантажується в приймальний резервуар, пройшовши через подрібнювач 3 до часток від 1-3 мм. Завантажений субстрат підігрівається за допомогою теплообмінника 4 до температури 25 °С і може втримуватись до 5 діб, в залежності від потреб у завантаженні ферментатора. В процесі підігрівання відбувається гомогенізація субстрату за рахунок мішалки 5. Подача біомаси у ферментатор 6 відбувається по фекалопроводу за рахунок насоса-дозатора 7 [10].

Ферментатор є повністю герметичним резервуаром з кислотостійкого залізобетону, що тепло ізолюється шаром утеплювача. Період перебування сировини в ферментаторі сягає від 20-40 діб при фіксованій для мікроорганізмів температурі в 34-37 °С. Також ферментатор обладнаний запобіжним клапаном (ПК1) 24, який призначений для захисту реактора від підвищеного тиску. При підвищенні тиску газу в біореакторі до 0,05 атм (5 кПа) електронно-контактний манометр (ЕКМ1) 25 дає команду компресору 15 на включення. Компресор закачує біогаз у газгольдер 13, допустимий тиск – 10 атм. При зниженні тиску газу в біореакторі до 0,02 атм (2 кПа) ЕКМ1 дає команду на відключення компресора. При підвищенні тиску в газгольдері до 10 атм ЕКМ2 дає команду на

відключення компресора. Для захисту від підвищеного тиску газгольдер обладнаний запобіжним клапаном (ПК2). При зниженні тиску в газгольдері

до 4 атм ЕКМ2 дає команду на включення двигуна - приводу мішалок 8.

Бактерії при перемішуванні збільшують свою активність тому при перемішуванні сировини в біореакторі різко зростає виробництво біогазу.

Перемішування біомаси усередині ферментатора проводиться похилими міксерами 8 з нержавіючої сталі, а підігрів відбувається за рахунок

циркулювання теплої води в теплообміннику 9. Температура води на вході в ферментатор 60 °С, після виходу з ферментатора біля 40 °С.

Система підігріву – це мережа трубок що знаходяться на внутрішній поверхні реактора. Біогазова установка укомплектована когенераційною установкою 11, де власне вода від охолодження двигуна внутрішнього згорання використовується для підігріву ферментатора. Температура води після генератора 90 °С. Витрати теплової і електричної енергії на потреби самої біогазової установки складають від 5 до 15% всієї енергії, яку дає біогазова установка.

Біогаз, що утворився в процесі анаеробного бродіння, через клапан 12 надходить і зберігається в газгольдері 13 де, в свою чергу, проходить вирівнювання тиску і складу біогазу. Від газгольдера через очисник 14 компресором 15 відбирається подача біогазу на когенераційну установку

Когенераційні установки – є устаткуванням для комбінованого виробництва електроенергії і тепла, в них застосовуються газопоршневі двигуни внутрішнього згорання, пристосовані до роботи на низькокалорійних газах. 3 1 м

3 біогазу в когенераційній теплоелектростанції

можна виробити 2-4 кВт·год електро- і 2-8 кВт·год теплової енергії. Біогаз

спалюється в теплоелектростанції безпосередньо без збагачення.

Газгольдер представляє собою високоміцну мембрану, яка стійка до підпалу чи прориву. Для додаткового захисту передбачається також тентове

покриття 16. При подачі біогазу до когенераційної установки відбувається зниження тиску до 0,1 атм. В разі надлишкової кількості частина біогазу може

бути скинута за рахунок запірної арматури 10 на факел через комутатор 17.

Переброджена маса з ферментатора 6 насосом 19 подається на сепаратор 18, який є шнековим пресом, в якому пресування проводиться за допомогою шнека, що дозволяє видавлювати всю вільну воду і більшість зв'язаної води. Це єдине устаткування для переробки субстрату, що ефективно відокремлює тверді складові, які виходять сухими і розсипчастими. При сепаруванні концентрація сухих речовин в біомасі складає біля 40%. Видалена рідка фракція зберігається в лагуні 20, а також подається для змішування зі свіжим субстратом на стадії гідролізу.

Надлишки рідкої фракції піддаються очищенню до досягнення показників зливу, що відповідають нормам на скидання у водоймища

рибогосподарського значення, або ця вода може бути використана для технічних потреб. Вижата тверда складова стрічковим транспортером 21 подається на гранулятор 22 звідки виходить суха речовина – високоякісне органічне добриво (гранулювання в чистому вигляді), або, як паливо для теплогенераторів – у вигляді пілет. Виробництво сухого гранульованого добрива практично виключає втрати живильних речовин при тривалому зберіганні, дозволяє вносити ці добрива до найбільш сприятливих календарних термінів із застосуванням стандартних механізмів

(наприклад, звичайні сівалки).

З ємкості зберігання рідких добрив насосами маса перекачується в

бочки-причепи і вивозиться на поля або на продаж як підживлююча сировина

для гідропонних теплиць. Основний варіант переробки рідкої фракції передбачається по технології ефективних мікроорганізмів та упаковки біодобри в пляшки по 0,3, 0,5, 1,0 л.

Існуюча технологія і конструкції біогазових установок засновані на багаторічному європейському досвіді їх використання. Згідно цього досвіду,

є певний зв'язок між параметрами установок, а саме: кількістю сировини і розміром реактора. Розмір реактора показує, з одного боку, кількість отриманих вихідних продуктів біогазової установки, а з іншої сторони – вартість усієї установки. 1.3.2 Структурні елементи технології

виробництва біогазу. Процес

переробки органічних відходів в біогаз та біодобрива складається з наступних блоків: блок підготовки; блок метаногенного зброджування субстрату: система підігріву реактора, система перемішування субстрату в реакторі, система термоізоляції реактора; блок енергозабезпечення; злив переробленого субстрату; модуль управління біогазовою установкою.

Кожен з блоків, у свою чергу, складається з окремих, послідовно виконуваних виробничих операцій і процесів. В якості прикладу, нижче дуже

стисло охарактеризовано ці операції і процеси на окремих етапах виробництва біогазу на рідких органічних відходах, до складу яких входить

близько 30% силосної кукурудзи.

Проаналізували всі конструкції біогазових установок, які застосовуються в світі, були розроблені основні принципи, по яких можна створювати біогазові установки. Конструкція установки базується на максимальному використанні стандартних деталей і вузлів, що виробляються

практично в будь-якій країні світу. Деталі вибрані з сучасних синтетичних матеріалів, які забезпечують хімічну стійкість, малу вагу, хорошу термоізоляцію. За розміром реактора установка відноситься до середніх біогазових комплексів на 1000-1300 одиниць ВРХ [11, 12].

Блок підготовки. Головним модулем біогазової установки є ферментатор, в якому відбувається два зустрічні процеси: процес гідролізу

–

окислення під дією гідролітичних мікроорганізмів з утворенням жирних кислот

і процес переробки жирних кислот метанотворними мікроорганізмами з виділенням біогазу. Щоб зробити процес утворення метану стійкішим, пропонується гідроліз проводити за межами ферментера в окремому модулі,

де буде відбуватись, безпосередньо, розведення початкової органічної маси для забезпечення необхідної вологості, підігрів до температури початку протікання процесу збродження, а також для закачування строго певної порції сировини із збереженням герметичності реактора і постійності тиску

газу на виході. Перенесення процесу гідролізу з ферментера в окремий резервуар

додає конкурентні переваги біогазовій установці і дозволяє: отримувати біогаз з вищим вмістом метану (близько 70%); забезпечити стабільну і безаварійну роботу всієї системи в цілому; уникнути створення у ферментаторі плаваючого шару; використовувати субстрати рослинного походження; підвищити газовіддачу з біосировини рослинного походження (солома трава, кормові відходи і т. д.) за рахунок розкладання целюлози; з легкістю здійснити перехід на іншу сировину, не залежно від її якості; підвищити питоме завантаження ферментатора і, як наслідок, зменшити його

розмір, а значить і витрати на будівництво; підвищити продуктивність

ферментатора.

Блок метаногенного зброджування субстрату. Основою кожної біогазової установки є ферментатор, що являє собою герметичний термос, в

якому підтримується задана постійна температура. Для цього використовується система підігріву і система перемішування сировини, які управляються блоком автоматики. Для вибору розмірів і конструкції реактора вирішальну роль грають такі чинники, як: масова витрата біомаси при заповненні; заданий вихід газу або ступінь бродіння субстрату як функція від концентрації сухих речовин, завантаження робочою простору, часу циклу бродіння до інтенсивності перемішування; вживана система виробництва; рівень механізації і автоматизації.

В нашому випадку розглядається двостадійна система, в якій на першій стадії процесу накопичуються летючі жирні кислоти, а на другій стадії йде,

власне, метаногенний процес. При об'ємах подачі біомаси в 63,1 м

3 за добу

економічно доцільно застосовувати вертикальні циліндрові реактори. Вони виготовляються на місці установки з залізобетону, який потім утеплюють різними способами. Основний мінус даної конструкції – це капітальна споруда специфічної конструкції, яку неможливо перемістити, та демонтувати.

Блок енергозабезпечення. Щоб раціонально використовувати біогаз необхідно передбачити акумуляцію газу в певному об'ємі, оскільки виробництво газу і його споживання часто не відповідають одне одному.

Газгольде, в якому накопичується вироблений біогаз та виконується функція стабілізатора тиску. Для газгольдерів високого тиску вибирають сферичні або циліндрові резервуари. Вони працюють зазвичай при робочому

тиску 0,8-1,8 МПа і мають місткість 10-10000 м

3 [13, 14]. До їх переваг

відносяться порівняно невеликі габарити і відсутність яких-небудь рухомих

частин. Недоліком вважається необхідність в компресорній установці. Для використання газу, як паливо, потрібне додаткове устаткування для

пониження тиску до 1-5 кПа. На газгольдери названого типу

розповсюджуються всі вимоги техніки безпеки, що пред'являються до

резервуарів високого тиску. Між реактором, газгольдером і споживачами

біогазу розміщується наступна додаткова апаратура: пристрій для захисту від

зворотного удару полум'я, газоочистка, газоосушувач, редукційний клапан.

У нашій біогазовій установці газгольдером служить сам реактор, який

закривається зверху спеціальною гумовою мембраною. Робочий об'єм

такого

газгольдера не дуже великий так, як установка немає нерівномірності в

споживанні газу, оскільки весь газ відразу переробляється в електрику.

Біогаз, вироблений біогазовою установкою, не подається

безпосередньо споживачеві, а проходить через декілька спеціальних

пристроїв, які можна назвати газовою системою біогазової установки.

Перш

за все, біогаз необхідно пропустити через зворотний клапан, який

забезпечує

рух газу тільки в одному напрямі, – від реактора до споживача.

Найпростіший зворотний клапан – рідинний, схожий на той, який ми

застосовуємо, зброджуючи домашнє вино. Цей зворотний клапан може

бути

загальним для декількох реакторів, забезпечуючи одночасно незалежність

їх

газових систем, і в той же час рівність тиску в робочих режимах. Для контролю над тиском газу встановлюється манометр. Також обов'язковим і найважливішим елементом є комутатор. Факельна установка – це пальник, на який подається іскра для запалення у момент спрацьовування запобіжного клапана (комутатора), і вогонь підтримується, поки запобіжний клапан відкритий. Тобто механізм дії такий самий, як і в сучасних газових плитах.

Злив перебродженого субстрату. Для середніх біогазових установок, на основі яких виконаний реактор даної конструкції, найвигідніше зливати шлам під дією сили тяжіння в ємність, розташовану нижче за реактор. При цьому система зливу є звичайною каналізаційною трубою з відповідним краном. Головна технологічна особливість – це закінчення труби, яке повинне забезпечити неможливість засмокування в реактор повітря при зливі.

Модуль управління біогазовою установкою. Для безперебійного функціонування біогазової установки необхідний блок автоматики, який контролює всі параметри і підтримує задану температуру і інтенсивність реакції. Робота блоку автоматики базується на інформації, що отримується декількома датчиками: датчиком температури сировини в реакторі, датчиками рівня сировини в реакторі. Ґрунтуючись на цих свідченнях, а також по сигналах таймера, блок автоматики включає і вимикає систему підігріву, систему перемішування. Блок автоматики базується на стандартних недорогих промислових контролерах. Для управління могутнім навантаженням, таким як електронагрівальні елементи або двигуни системи перемішування, застосовуються магнітні пускачі [15].

#### 1.4 Підбір технологічного обладнання лінії з виробництва біогазу

Технологічне обладнання є найбільш важливим етапом проектування, оскільки від цього залежить економічність проектування та економічна

ефективність виробничої діяльності підприємства: продуктивність, розміри прибутку та рентабельність.

Для підбору обладнання лінії по виробництву біомаси та біодобрив з відходів вихідними даними є вихід біогазу та розрахунковий об'єм реактора.

Кількість машин для лінії заданої продуктивності знаходимо за формулою:

$$n_H = \frac{Q_E}{Q_M},$$

де:  $Q_E$  - об'єм біомаси, кг/год;  $Q_M$  - продуктивність машини, кг/год.

Підбираємо фекальний насос для перекачування відходів з ферми або цистерн, а також для подачі підготовленої сировини з гідролізного блоку в ферментатор та відбору перебродженого субстрату з нього. Кількість однотипних насосів в об'єкті що досліджується рівна 3-ом, максимальна кількість перекачаного субстрату рівна 2630 кг/год

Стабільний температурний режим є ключовим фактором для підтримки ефективності ферментації в біогазовій установці. Для цього застосовується система автоматизації, що включає водяний обігрів, датчики температури

та автоматичне керування, яке забезпечують мікроконтролери Raspberry Pi та Arduino.

### **Основні операції для підтримки температурного режиму:**

#### **водяний обігрів через трубопровід, прокладений до реактора**

**робота системи обігріву:** Для підтримки потрібної температури використовується водяний обігрів. Вода, нагріта до заданої температури, циркулює через систему труб, прокладених до реактора, і передає тепло для стабільної ферментації.

**контроль температури теплоносія:** Система обігріву включає температурні датчики, що контролюють як температуру води, так і температуру в реакторі. Датчики з'єднані з Arduino, яка передає дані на Raspberry Pi для аналізу та автоматичного регулювання підігріву. Якщо температура субстрату в реакторі знижується, система збільшує потік гарячої води, і навпаки, при перегріванні – зменшує подачу теплоносія.

**циркуляція теплоносія:** Для циркуляції води використовується насос, керований через реле Arduino. Завдяки насосу вода постійно циркулює по системі труб, рівномірно розподіляючи тепло. Arduino і Raspberry Pi регулюють швидкість циркуляції в залежності від виміряної температури.

#### **контроль температури у різних зонах реактора**

**встановлення датчиків:** Для точного контролю температури всередині реактора встановлено кілька датчиків (наприклад, DS18B20) у різних частинах реактора. Це дозволяє отримувати дані про температуру в реальному часі, запобігаючи локальним перегрівам або охолодженню субстрату.

**збір даних і передача на обробку:** Датчики підключені до Arduino, яка зчитує дані і передає їх на Raspberry Pi. Дані збираються в режимі реального часу, що дозволяє постійно

контролювати температурні параметри в системі та швидко реагувати на будь-які зміни.

### **втоматизація управління системою обігріву та охолодження за допомогою контролерів Raspberry Pi та Arduino**

**aspberry Pi як основний контролер:** Raspberry Pi виконує роль центрального процесора системи, запускаючи веб-сервер зі SCADA-інтерфейсом, через який оператор може стежити за температурою в реакторі та керувати процесом віддалено. Він приймає дані від Arduino, обробляє їх, приймає рішення щодо нагріву або охолодження і передає команди назад Arduino для виконання.

#### **duino для роботи з датчиками та виконавчими**

**пристроями:** Arduino відповідає за збір даних з температурних датчиків та керування виконавчими пристроями. Наприклад, якщо Raspberry Pi визначає потребу в зміні температури, він передає команду на Arduino, яка через реле керує насосом, клапанами та іншими пристроями.

**нтеграція з SCADA-системою:** На Raspberry Pi розміщений веб-сервер, що дозволяє оператору віддалено моніторити та керувати параметрами системи. Через SCADA-інтерфейс оператор може налаштовувати порогові значення температури, запускати або зупиняти систему обігріву, а також отримувати сповіщення про критичні ситуації.

#### **езервний контур охолодження**

**ктивация системи охолодження:** У разі перевищення допустимої температури система обігріву автоматично переводиться у режим охолодження. Гарячий теплоносій перенаправляється через зворотний контур, де проходить через охолоджувальний резервуар або радіатор, що знижує температуру води перед її повторною подачею в систему.

**регулювання температури через резервний контур:** Завдяки інтеграції з контролерами, температура теплоносія в системі охолодження автоматично коригується залежно від поточних вимірювань, що дозволяє зберігати баланс температури навіть під час інтенсивного ферментування.

#### **Контроль інших параметрів (вологість і кислотно-лужний баланс)**

**вологість:** Оскільки рівень вологості також впливає на ефективність ферментації, датчики вологості можуть бути інтегровані з системою, що дозволяє контролювати і регулювати цей параметр.

**pH:** Вимірювання кислотно-лужного балансу є важливим для активності бактерій, що забезпечують ферментацію. Залежно від виміряного рівня рН система може автоматично коригувати режим підігріву для стабілізації параметрів середовища в реакторі.

#### **Переваги водяної системи обігріву з автоматизованим контролем**

- **Рівномірний розподіл тепла:** Циркуляція води забезпечує постійне та рівномірне прогрівання субстрату, що сприяє стабільній температурі у всьому реакторі.
- **Автоматизоване управління:** Використання Arduino та Raspberry Pi дозволяє підтримувати температурний режим автоматично, реагуючи на коливання параметрів без втручання оператора.
- **Енергоефективність:** Система контролює нагрів на основі актуальних даних, що знижує споживання енергії і мінімізує затрати.
- **Дистанційний контроль:** SCADA-система на Raspberry Pi дозволяє оператору стежити за параметрами і керувати установкою через веб-інтерфейс, зокрема вносити коригування віддалено.

Ця інтегрована система обігріву і контролю параметрів дозволяє забезпечити оптимальні умови для біологічного процесу ферментації, що

покращує стабільність роботи біогазової установки та збільшує вихід біогазу.

## **1.2. Інформаційний аналіз об'єкта керування**

### **Характеристика об'єкта керування**

Об'єктом керування є біогазова установка, зокрема її реактор, де відбувається процес анаеробної ферментації органічних відходів з утворенням біогазу. Ефективність цього процесу залежить від ряду параметрів, серед яких температура є одним із найважливіших. Оптимальна температура забезпечує активність мікроорганізмів, що розкладають органічну матерію, і впливає на швидкість та обсяг виробництва біогазу.

### **Параметри, що підлягають контролю**

#### **температура в реакторі:**

**обочий діапазон температур:** Залежно від типу ферментації (мезофільна при 30-40°C або термофільна при 50-60°C).

**критичні значення:** Відхилення від оптимального діапазону може призвести до зниження активності бактерій або їх загибелі.

#### **температура теплоносія (води):**

контроль температури теплоносія важливий для ефективного передачі тепла до реактора.

#### **кислотність і кислотно-лужний баланс (pH) субстрату:**

**кислотність:** Впливає на рухливість мікроорганізмів і процеси розкладання.

: Оптимальний рівень pH забезпечує сприятливі умови для бактерій.

#### **елементи виконавчих пристроїв:**

**насоси і клапани:** Відповідають за циркуляцію теплоносія.

еле: Керують увімкненням/вимкненням систем обігріву та охолодження.

#### **керування та зворотний зв'язок:**

**рішення про керування:** На основі аналізу даних Raspberry Pi приймає рішення про необхідність коригування температурного режиму.

**команди на Arduino:** Raspberry Pi надсилає команди на Arduino для керування насосами, клапанами, реле.

**варіантні сповіщення:** У разі критичних відхилень система генерує сповіщення для оператора через веб-інтерфейс, email або месенджери.

#### **Моделювання інформаційних процесів**

##### **тематика потоків даних:**

**вхідні дані:** Показники датчиків (температура, вологість, рН).

**логіка обробки:** Аналіз даних, порівняння з заданими параметрами, прийняття рішень.

**вихідні дані:** Команди для виконавчих пристроїв, оновлення даних у SCADA, сповіщення.

##### **алгоритми обробки даних:**

**контрольні цикли:** Періодичне зчитування даних та їх аналіз.

**логіка прийняття рішень:** Якщо температура виходить за межі норми, система автоматично коригує параметри.

**автоматизація:** Можливе впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування змін та оптимізації керування.

#### **Технічні засоби для реалізації інформаційного аналізу**

##### **обладнання:**

**датчики:** Для збору даних з датчиків та керування виконавчими пристроями.

**сервер:** Для обробки даних, запуску веб-сервера та SCADA-системи.

**датчики:** DS18B20 (температура)

## **програмне забезпечення:**

**програми для Arduino:** Скетчі для зчитування даних та керування пристроями.

**операційна система Raspberry Pi OS:** Для роботи Raspberry Pi.

**SCADA-система:** Розроблена за допомогою Node.js.

**база даних:** SQLite.

**протоколи зв'язку:** MQTT, HTTP

## **захист даних:**

**шифрування передачі:** Використання HTTPS та SSL/TLS для захисту даних при передачі.

**автентифікація користувачів:** Паролі, двофакторна автентифікація для доступу до SCADA-системи.

## **надійність системи:**

**резервне копіювання даних:** Регулярне збереження копій бази даних.

**моніторинг стану обладнання:** Виявлення та сповіщення про збої в роботі датчиків або контролерів.

**автоматичне перезавантаження:** Скрипти для автоматичного перезапуску системи у разі збою.

## **Інтеграція з іншими системами**

- **Можливість розширення:** Система може бути інтегрована з іншими модулями біогазової установки, наприклад, контролем тиску, рівня газу, автоматичною подачею субстрату.
- **API для сторонніх додатків:** Надання інтерфейсів для доступу до даних іншими програмами або сервісами.

## **Висновки інформаційного аналізу**

Інформаційний аналіз об'єкта керування показує, що ефективне управління температурним режимом у біогазовій установці вимагає комплексного підходу до збору, передачі та обробки даних. Використання Arduino та Raspberry Pi забезпечує необхідну гнучкість та потужність для реалізації

системи контролю. Завдяки інтеграції з SCADA-системою оператор отримує повний контроль над процесом, можливість віддаленого моніторингу та оперативного реагування на зміни, що в кінцевому підсумку підвищує ефективність роботи біогазової установки

### **1.3. Розробка функціональної схеми автоматизації**

Розробка функціональної схеми автоматизації є ключовим етапом у створенні системи контролю температурного режиму біогазової установки. Ця схема дозволяє візуалізувати всі компоненти системи, їх взаємодію та потоки даних між ними. Основна мета — забезпечити ефективне та стабільне управління технологічним процесом з використанням сучасних засобів автоматизації, таких як Raspberry Pi та Arduino.

Вимоги до автоматизації БГУ можна сформулювати таким чином:

автоматизована подача субстрату в біореактор, для забезпечення стабільного мезофільного процесу, з метою стабілізації виходу біогазу;

автоматичний режим комутації мішалок, особливо це важливо для густих субстратів в ферментаторі, насосів подачі субстрату та сепараторів;

автоматичне регулювання температурних режимів в ферментаторі через обігрів резервуара ферментатора за допомогою контурів обігріву для підтримування температури субстрату;

### **Структура функціональної схеми**

Функціональна схема автоматизації включає наступні основні компоненти:

#### **Біореактор біогазової установки**

це місце, де відбувається анаеробна ферментація органічних відходів з утворенням біогазу.

#### **Система водяного обігріву**

**агрівач теплоносія:** забезпечує підігрів води до необхідної температури.

**иркуляційний насос:** забезпечує рух теплоносія через систему труб.

**рубопровідна система:** труби, прокладені до реактора для передачі тепла.

#### **атчики**

**емпературні датчики в реакторі (DS18B20):** вимірюють температуру субстрату в різних зонах реактора.

**емпературні датчики теплоносія:** контролюють температуру води на вході та виході з реактора.

**атчики вологості та рН:** моніторять додаткові параметри для повного контролю процесу.

**бір даних:** зчитує інформацію з датчиків.

**ерування виконавчими пристроями:** керує насосами, клапанами та реле на основі команд від Raspberry Pi.

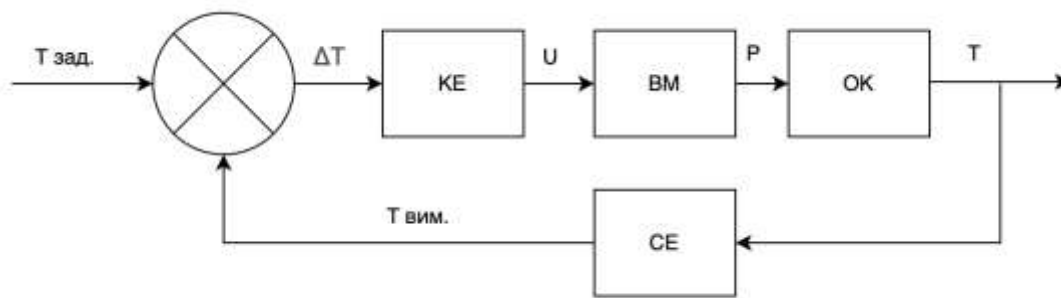
**ередача даних:** відправляє зібрані дані на Raspberry Pi для обробки.

**робка даних:** аналізує отримані від Arduino дані.

**рийняття рішень:** визначає необхідність коригування параметрів.

**САДА-система:** забезпечує веб-інтерфейс для моніторингу та керування.

**ередача команд:** надсилає команди на Arduino для виконання.



## Опис функціональної схеми автоматизації температурного режиму

Схема автоматизації температурного контролю в біогазовій установці (БГУ) відображає процеси збору даних, обробки інформації, прийняття рішень та управління виконавчими механізмами для підтримки оптимальної температури біомаси. Основні елементи та потоки взаємодії пояснені нижче.

### ехнічні позначення основних елементів:

**Е (Керуючий елемент):** відповідає за обробку даних та прийняття рішень щодо регулювання температури. Це блок управління, реалізований на базі контролера Raspberry Pi, який аналізує виміряну температуру та порівнює її із заданим значенням.

**М (Виконавчий механізм):** виконує команди від KE, регулюючи потужність системи підігріву теплоносія, що впливає на температуру у ферментаторі. Виконавчі механізми можуть включати насоси, клапани або реле для управління обігрівом.

**К (Об'єкт керування):** біореактор або ферментатор, де відбувається основний процес ферментації біомаси. Саме тут підтримується необхідна температура для забезпечення оптимальної активності метанових бактерій.

**Е (Сприймаючий елемент):** датчик температури, що зчитує

поточне значення температури в об'єкті керування і передає дані на КЕ.

### **сновні параметри та потоки в системі:**

**задається (Т зад.):** задане значення температури, що встановлюється для оптимального перебігу ферментації в БГУ. Це температура, яку необхідно підтримувати у ферментаторі.

**виміряне (Т вим.):** реальне, виміряне значення температури в ферментаторі, яке постійно зчитується датчиками (СЕ) та передається на контролер (КЕ).

**Т (Різниця температур):** визначається як різниця між заданою та виміряною температурою ( $\Delta T = T_{\text{зад.}} - T_{\text{вим.}}$ ). Цей параметр використовується для обчислення необхідного впливу на виконавчий механізм для досягнення потрібної температури.

**(Керуюча дія):** сигнал, що формується контролером КЕ на основі  $\Delta T$  та передається на виконавчий механізм (VM). Цей сигнал визначає інтенсивність впливу на систему обігріву.

**(Потужність виконавчого механізму):** реальна потужність, яку застосовує VM для нагрівання або охолодження ферментатора, щоб привести температуру до заданого значення.

### **процес автоматичного регулювання:**

**рок 1:** Контролер КЕ отримує значення виміряної температури (Т вим.) від сприймаючого елемента СЕ.

**рок 2:** КЕ порівнює Т вим. із заданим значенням температури (Т зад.) і обчислює різницю температур ( $\Delta T$ ).

**рок 3:** На основі  $\Delta T$  контролер КЕ визначає необхідну керуючу дію (U), щоб компенсувати різницю і забезпечити стабільність температури.

**рок 4:** Керуюча дія U передається на виконавчий механізм VM,

який коригує свою потужність (P) відповідно до необхідного впливу.

**рок 5:** Виконавчий механізм VM впливає на об'єкт керування (OK), змінюючи температуру в ферментаторі для досягнення заданого значення.

**рок 6:** Процес повторюється в циклі для підтримки стабільного температурного режиму в реальному часі.

**воротний зв'язок та моніторинг:**

онтолер (KE) працює у режимі зворотного зв'язку, постійно отримуючи оновлені дані від сприймаючого елемента (CE). Це дозволяє контролеру миттєво реагувати на будь-які зміни в температурі об'єкта керування.

истема моніторингу на базі SCADA дозволяє оператору спостерігати за усіма етапами роботи системи, включаючи поточне значення температури, потужність виконавчого механізму та будь-які відхилення від заданих параметрів.

**Переваги такої схеми автоматизації:**

Система забезпечує стабільне підтримання температури завдяки постійному циклічному контролю.

Використання зворотного зв'язку дозволяє швидко реагувати на зовнішні зміни, що впливають на температуру, такі як зміна складу субстрату чи навколишніх умов.

SCADA-система дозволяє оператору мати повний контроль над процесом, з можливістю дистанційного втручання у разі необхідності.

Ця схема автоматизації забезпечує стабільність процесу ферментації у біогазовій установці, що сприяє максимальній ефективності виробництва біогазу та теплової енергії для подальшого підігріву субстрату.

## **РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ**

### **Розробка моделі теплового режиму біогазового реактора**

У цій роботі представлена математична модель, яка описує зміну температури субстрату в біогазовому реакторі. Контроль температурного режиму є важливим аспектом для забезпечення ефективного перебігу біохімічних процесів, оскільки температурний режим безпосередньо впливає на швидкість розкладу органічних речовин та утворення біогазу. В даній моделі враховуються теплові втрати через стінки реактора, тепло, що генерується біохімічними реакціями, а також зовнішнє нагрівання.

### **Основні параметри моделі**

У моделі використовуються такі основні параметри:

$q_{bio}$  — Тепло від біохімічних реакцій:

е тепло, що виділяється під час біохімічних процесів у реакторі. У нашому випадку значення обране як 20 Вт, враховуючи відомі літературні дані для типової інтенсивності біохімічних реакцій у подібних умовах.

— Коефіцієнт теплових втрат:

коєфіцієнт теплових втрат, який описує інтенсивність передачі тепла через стінки реактора. У моделі прийняте значення 2.9

Вт/(м<sup>2</sup>°С), що є типовим значенням для реакторів з подібними теплоізоляційними властивостями.

— Площа поверхні реактора:

Площа поверхні реактора, через яку відбуваються теплові втрати. Для даного дослідження обрано площу поверхні 0.5 м<sup>2</sup>.

— Температура зовнішнього середовища:

Температура навколишнього середовища, прийнята на рівні 20 °С, є характерною для умов експлуатації реактора.

— Об'єм реактора:

Об'єм, заповнений субстратом у реакторі, обраний на рівні 0.05 м<sup>3</sup>, що відповідає встановленій конструкції експериментального реактора.

**ρ**— Густина субстрату:

Густина субстрату в реакторі встановлена як 1000 кг/м<sup>3</sup>, що відповідає густині води, оскільки субстрат у значній мірі складається з рідкої фази.

— Питома теплоємність субстрату:

Питома теплоємність субстрату обрана рівною 4180 Дж/(кг°С), що відповідає теплоємності води. Цей параметр визначає кількість енергії, необхідної для підвищення температури субстрату на один градус.

— Зовнішнє джерело тепла:

Мощність зовнішнього нагріву складає 9 Вт. Це значення було обране для забезпечення додаткового тепла в умовах низької температури навколишнього середовища.

— Початкова температура реактора:

Початкова температура субстрату в реакторі становить 30 °С.

## **Диференціальне рівняння моделі**

Зміна температури субстрату в реакторі описується за допомогою диференціального рівняння теплового балансу, яке враховує внутрішнє тепло від біохімічних реакцій, зовнішній нагрів та теплові втрати:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{\text{bio}} + Q_{\text{ext}} - U \cdot A \cdot (T - T_{\text{env}})}{m \cdot c}$$

де:

- тепло, що генерується в результаті біохімічних реакцій (Вт),
- потужність зовнішнього джерела нагріву (Вт),
- $\cdot A \cdot (T - T_{\text{env}})$  — теплові втрати через стінки реактора, які пропорційні різниці температур між реактором і зовнішнім середовищем,
- $\cdot c$  — теплоємність субстрату, яка визначається як добуток його маси і питомої теплоємності.

Це рівняння описує баланс тепла в системі, де тепло від біохімічних реакцій та зовнішнього нагріву сприяє підвищенню температури, а теплові втрати — її зниженню.

### Розв'язання моделі

Для розв'язання диференціального рівняння використовується чисельний метод, реалізований у MATLAB за допомогою функції ode45. Часовий інтервал інтеграції обрано рівним 500 годин, що дозволяє оцінити динаміку температури в реакторі протягом тривалого періоду.

**% Константи**

$Q_{\text{bio}} = 20$ ; % Тепло від біохімічних реакцій (Вт)

$U = 2.9$ ; % Коефіцієнт теплових втрат (Вт/(м<sup>2</sup>·°C))

$A = 0.5$ ; % Площа поверхні реактора (м<sup>2</sup>)

$T_{\text{env}} = 20$ ; % Температура зовнішнього середовища (°C)

$V = 0.05$ ; % Об'єм реактора (м<sup>3</sup>)

```

rho = 1000; % Густина субстрату (кг/м^3)
c = 4180; % Теплоємність субстрату (Дж/кг°C)
m = V * rho; % Маса субстрату (кг)
Q_ext = 9; % Зовнішня потужність нагріву (Вт)

% Початкова температура реактора
T0 = 30; % (°C)

% Час інтеграції (секунди)
tspan = [0, 500 * 3600]; % 500 годин, конвертуємо в секунди

% Розв'язання диференціального рівняння
[t, T] = ode45(@temperature_model, tspan, T0);

% Побудова графіку
figure;
plot(t / 3600, T, 'b', 'LineWidth', 1.5); % Конвертуємо час в години для графіку
title('Зміна температури в біогазовому');
xlabel('Час (год)');
ylabel('Температура (°C)');
grid on;

% Функція моделі температури
function dTdt = temperature_model(t, T)
    % Константи
    Q_bio = 20; % Тепло від біохімічних реакцій (Вт)
    U = 2.9; % Коефіцієнт теплових втрат (Вт/(м^2*°C))
    A = 0.5; % Площа поверхні (м^2)
    T_env = 20; % Температура зовнішнього середовища (°C)
    V = 0.05; % Об'єм (м^3)
    rho = 1000; % Густина (кг/м^3)
    c = 4180; % Теплоємність (Дж/кг°C)
    m = V * rho; % Маса (кг)
    Q_ext = 9; % Зовнішня потужність нагріву (Вт)

    % Диференціальне рівняння для температури
    dTdt = (Q_bio + Q_ext - U * A * (T - T_env)) / (m * c);
end

```

## Аналіз результатів

Отриманий графік показує зміну температури субстрату в реакторі протягом часу, що дозволяє проаналізувати ефективність обраних параметрів для підтримки оптимального температурного режиму. Модель дозволяє виявити, наскільки ефективно внутрішні і зовнішні джерела тепла компенсують теплові втрати, забезпечуючи стабільність температури для оптимальних умов ферментації.

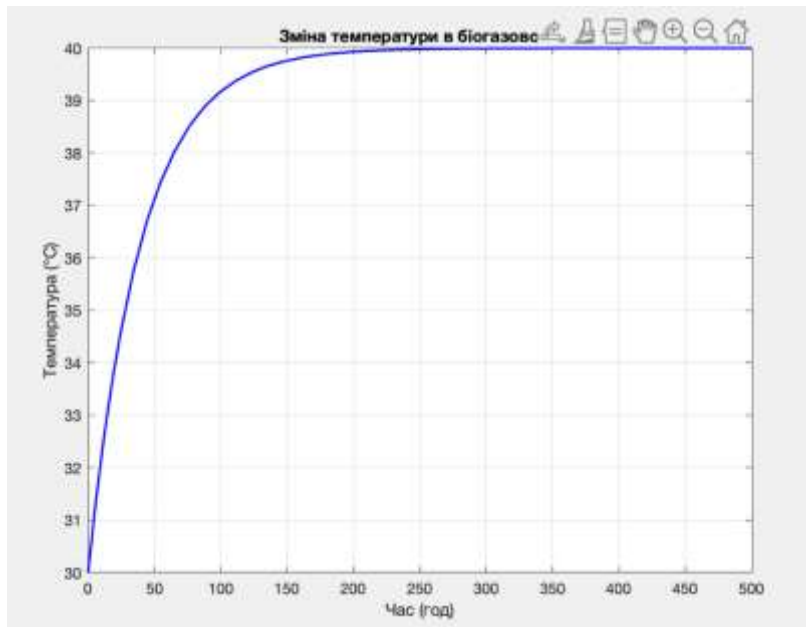
### **Фізичне значення рівняння**

Рівняння теплового балансу відображає такі фізичні процеси:

- **Накопичення тепла:** Якщо тепла (від біохімічних реакцій і зовнішнього джерела) додається більше, ніж втрачається, температура в реакторі зростатиме.
- **Теплові втрати:** Якщо температура всередині реактора вища за температуру навколишнього середовища, тепло передається від реактора до навколишнього середовища, що знижує температуру субстрату.
- **Регулювання температури:** Для підтримання стабільної температури використовується зовнішнє джерело тепла  $Q_{ext}$  яке можна налаштувати так, щоб компенсувати теплові втрати, особливо за умов змінної температури навколишнього середовища.

### **Візуалізація результатів**

Графічне зображення результатів моделювання дозволяє проаналізувати динаміку температури в реакторі в залежності від часу. Це дає можливість оцінити, наскільки ефективно підтримується оптимальна температура в реакторі за допомогою біохімічних реакцій та зовнішнього нагріву



На графіку зображена зміна температури в біогазовому реакторі як функція часу, де температура субстрату поступово зростає до досягнення стабільного значення. Давайте розглянемо цей графік детальніше:

### Опис графіку

- **Ось X:** Час, виражений у годинах. Інтервал вимірювань охоплює до 500 годин.
- **Ось Y:** Температура субстрату в біогазовому реакторі, виражена в градусах Цельсія (°C).
- **Крива температури:** Зображає зміну температури реактора з початкового значення 30°C до стабільного значення близько 39.5—

### Аналіз поведінки кривої

#### Початкова фаза (0–50 годин):

а початку температурний підйом є досить різким. Це пояснюється високою початковою тепловою потужністю від біохімічних реакцій і зовнішнього нагріву, що разом сприяють швидкому зростанню температури.

цій фазі температура субстрату наближається до рівноважного значення, але ще не досягає його.

#### **Проміжна фаза (50–150 годин):**

емпература зростає повільніше в міру наближення до стабільного стану. У цій фазі теплові втрати через стінки реактора починають наближатися до кількості тепла, що надходить до системи, тим самим зменшуючи темп підвищення температури.

истема переходить до динамічної рівноваги між кількістю тепла, що додається (від біохімічних реакцій і зовнішнього нагріву), і тепловими втратами.

#### **Фаза стабілізації (після 150 годин):**

емпература реактора досягає майже стабільного значення, яке знаходиться близько 39.5–40°C. У цій фазі швидкість підвищення температури майже нульова, що свідчить про досягнення теплової рівноваги.

е означає, що надходження тепла з біохімічних реакцій і зовнішнього нагріву точно врівноважують теплові втрати до навколишнього середовища, підтримуючи стабільну температуру.

#### **Інтерпретація та висновки**

- **Стабільна температура:** Графік показує, що система здатна досягти стабільного температурного режиму, що є важливим для оптимального протікання біохімічних процесів у біогазовому реакторі. Температура близько 39.5–40°C є оптимальною для мезофільних мікроорганізмів, що зазвичай використовуються в процесі біогазової ферментації.
- **Динамічна рівновага:** Досягнення стабільного значення температури свідчить про встановлення динамічної рівноваги. Це

означає, що поточні параметри системи (зовнішній нагрів, площа поверхні, коефіцієнт теплових втрат) достатні для підтримки необхідного температурного режиму в довгостроковій перспективі.

- **Ефективність нагріву:** Графік демонструє, що зовнішнє джерело нагріву разом з біохімічними реакціями забезпечують достатню кількість тепла для підтримання стабільної температури, проте темп досягнення стабільного значення можна регулювати при потребі, змінюючи потужність зовнішнього нагріву або підвищуючи теплоізоляцію реактора.

### РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

Автоматизація температурного режиму біогазової установки є критично важливою для забезпечення стабільного та ефективного процесу ферментації. Одним з підходів, який був обраний для керування температурою у цій роботі, є використання нечіткої логіки. Нечітка логіка дозволяє забезпечити гнучке та адаптивне управління, враховуючи складні та непередбачувані зміни умов у реакторі.

#### **Проблематика традиційних методів керування**

У попередніх розділах було побудовано математичну модель теплового режиму біогазового реактора, яка описує зміну температури субстрату. Проте, практичне керування такими об'єктами часто ускладнене через:

- **Нелінійність та складність моделі:** Реальні біогазові реактори характеризуються нелінійними процесами, залежностями та багатофакторністю.
- **Невизначеність та варіабельність параметрів:** Параметри процесу можуть змінюватися з часом, а також мати невизначеності через зовнішні впливи або зміни складу субстрату.

- **Труднощі в отриманні точної математичної моделі:** Отримання точної моделі може бути складним або неможливим через складність процесів і непередбачувані зміни.

### **Переваги нечіткої логіки**

Нечітка логіка дозволяє вирішити ці проблеми завдяки:

- **Можливості працювати з нечіткими та неточними даними:**  
Нечітка логіка дозволяє враховувати невизначеності та неточності в даних.
- **Людиноподібне мислення:** Правила нечіткої логіки можуть бути сформульовані на основі експертних знань та описувати поведінку системи в термінах, зрозумілих людині.
- **Гнучкість та адаптивність:** Нечіткі системи можуть легко адаптуватися до змін у системі без потреби в перерахунку складних математичних моделей.

Нечітка система керування складається з наступних основних компонентів:

- **Фазифікація (Fuzzification):** Перетворення чітких вхідних значень у нечіткі множини.
- **База правил:** Набір нечітких правил типу "Якщо... то...", які визначають поведінку системи.
- **Дедукційний механізм (Inference Engine):** Процес виведення керуючого впливу на основі нечітких правил та вхідних даних.
- **Дефазифікація (Defuzzification):** Перетворення нечітких вихідних даних у чіткий керуючий сигнал.

**Вхідні змінні:**

- **Похибка температури ( $e$ ):** Різниця між заданою температурою та виміряною температурою :
- **Зміна похибки температури ( $\Delta e$ ):** Різниця між поточною похибкою та попередньою:

**Вихідна змінна:**

- **Керуючий вплив (u):** Потужність нагріву або сигнал для керування виконавчим механізмом.

#### Терм-множини для вхідних та вихідних змінних:

- Для похибки температури (e):
  - сильно негативна
  - середньо негативна
  - мало негативна
  - нульова
  - мало позитивна
  - середньо позитивна
  - сильно позитивна
- Для зміни похибки ( $\dot{e}$ ): Аналогічні терм-множини.
- Для керуючого впливу (u): NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB

#### Функції належності:

Вибір трикутних або трапецієподібних функцій належності для простоти обчислень і зручності налаштування.

Приклад трикутної функції належності для терму NB:

де  $i$  — точки переходу функції належності.

База правил формується на основі експертних знань про систему. Приклад правил:

- Якщо  $e = \mathbf{PB}$  і  $\dot{e} = \mathbf{NB}$
- Якщо  $e = \mathbf{ZE}$  і  $\dot{e} = \mathbf{ZE}$
- Якщо  $e = \mathbf{NB}$  і  $\dot{e} = \mathbf{PB}$

Таблиця правил може бути представлена у вигляді матриці, де рядки відповідають значенням e, стовпці —  $\dot{e}$ , а на перетині записані значення u.

#### Метод дедукції:

- Використовує метод Мамдані для виведення нечітких висновків на основі правил та вхідних даних.
- Правила комбінуються за допомогою операторів мінімуму (AND) та максимуму (OR).

## **Дефазифікація:**

- **Метод центру ваги (Center of Gravity, COG):**

де — об'єднана функція належності вихідної змінної.

**Зчитування вхідних даних:** Зчитування вхідних даних: Вимірювання поточної температури . **Обчислення похибки та її зміни:** Обчислення похибки та її зміни: **Фазифікація:** Фазифікація: Перетворення та у нечіткі множини за допомогою функцій належності. **Виведення:** Виведення: Застосування бази правил для отримання нечітких значень керуючого впливу. **Агрегація та композиція:** Агрегація та композиція: Об'єднання результатів правил для формування об'єднаної функції належності вихідної змінної. **Дефазифікація:** Дефазифікація: Перетворення нечіткого вихідного значення в чітке керуюче значення . **Застосування керуючого впливу:** Застосування керуючого впливу: Надсилання керуючого сигналу на виконавчий механізм для регулювання температури.

## **Побудова симуляційної моделі**

Для аналізу роботи нечіткої системи керування використовується програмне забезпечення MATLAB та його інструментарій для нечіткої логіки (Fuzzy Logic Toolbox).

## **Кроки моделювання:**

**Створення нечіткої системи (FIS):** Створення нечіткої системи (FIS): Визначення вхідних та вихідних змінних, їх терм-множин та функцій належності. **Введення бази правил:** Введення бази правил: Формалізація експертних правил у системі. **Моделювання об'єкта керування:** Моделювання об'єкта керування: Використання раніше побудованої математичної моделі теплового режиму реактора. **Імітація роботи системи:** Імітація роботи системи: Запуск моделі для аналізу динаміки системи при різних початкових умовах та збуреннях. **Аналіз результатів:** Аналіз результатів: Оцінка ефективності регулятора за показниками перехідного процесу (перерегулювання, час встановлення, стійкість).

## **Приклад реалізації в MATLAB**

% Завантаження Fuzzy Inference System

% Параметри моделювання

T\_set = 40; % Задана температура (°C)

T\_initial = 30; % Початкова температура (°C)

time\_span = [0, 500 \* 3600]; % 500 годин в секундах

% Початкові умови

Попередня похибка

% Розв'язання диференціального рівняння з нечітким регулятором

% Функція моделі з нечітким регулятором

% Параметри системи (аналогічні попереднім)

% Обчислення похибки та її зміни

% Нечітке керування

% Обмеження керуючого впливу

% Диференціальне рівняння

% Оновлення попередньої похибки

### Оцінка ефективності регулятора

- **Час встановлення:** Час, необхідний для досягнення заданої температури з допустимою похибкою.
- **Перерегулювання:** Максимальне перевищення заданої температури під час перехідного процесу.
- **Стійкість:** Здатність системи повертатися до заданого режиму після збурень.

### Порівняння з традиційними методами

- Нечіткий регулятор може показувати кращу адаптивність до змінних умов порівняно з традиційними PID-регуляторами.
- У випадку нелінійностей або невизначеностей нечіткий регулятор забезпечує більш стабільне керування.
- **Ефективність:** Нечіткий регулятор забезпечує ефективне керування температурним режимом біогазового реактора.
- **Адаптивність:** Здатність адаптуватися до змін у процесі та невизначеностей.
- **Простота налаштування:** Можливість налаштування регулятора на основі експертних знань без глибокого математичного моделювання.

Таким чином, вибір алгоритму керування на основі нечіткої логіки є обґрунтованим та доцільним для даного об'єкта керування. Це дозволяє забезпечити стабільність процесу, ефективність виробництва біогазу та підвищити надійність системи керування.

## Розділ 4

### 4.1. Вибір технічних засобів

Для ефективної реалізації алгоритму керування температурним режимом біогазового реактора необхідно обрати відповідні технічні засоби, які забезпечать надійну роботу системи в реальних умовах експлуатації. До складу технічних засобів входять: контролери, датчики, виконавчі механізми, комунікаційні інтерфейси та програмне забезпечення. Основною метою є створення системи, яка відповідатиме вимогам точності, надійності, енергоефективності та масштабованості.

Вимоги до технічних засобів

При виборі технічних засобів враховуються наступні вимоги:

1. **Точність контролю температури:** Система повинна забезпечувати підтримку температури з похибкою не більше  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .
2. **Надійність і стійкість:** Обладнання повинно безвідмовно працювати в умовах підвищеної вологості та агресивних середовищ.
3. **Енергоефективність:** Використання обладнання з низьким енергоспоживанням для зменшення експлуатаційних витрат.
4. **Гнучкість та масштабованість:** Можливість розширення системи та адаптації до змін у технологічному процесі.
5. **Простота інтеграції та обслуговування:** Обладнання повинно бути легко інтегрованим у існуючу інфраструктуру та не вимагати складного обслуговування.

Вибір контролера системи керування

**Мікроконтролер ATmega328** було обрано як основний елемент системи керування.

Це 8-розрядний мікроконтролер з архітектурою AVR, який має достатню обчислювальну потужність для реалізації алгоритмів нечіткої логіки при оптимізації коду.

**Основні характеристики ATmega328:**

- **Пам'ять програм:** 32 КБ Flash.
- **Оперативна пам'ять:** 2 КБ SRAM.

- **Кількість цифрових входів/виходів:** 14 пінів (з них 6 можуть використовуватись для ШІМ).
- **Кількість аналогових входів:** 6 каналів АЦП з роздільною здатністю 10 біт.
- **Тактова частота:** до 20 МГц (зазвичай 16 МГц з кварцовим резонатором).

#### **Переваги використання ATmega328:**

- **Енергоефективність:** Низьке енергоспоживання дозволяє зменшити витрати на електроенергію.
- **Простота програмування:** Широко використовувана платформа Arduino Uno базується на ATmega328, що спрощує розробку та налагодження програмного забезпечення.
- **Доступність компонентів:** Компоненти та аксесуари легко доступні на ринку за невисокою ціною.
- **Підтримка спільноти:** Велика кількість ресурсів, бібліотек та прикладів коду.

#### 4.1.4. Вибір датчиків температури

Для вимірювання температури субстрату було обрано **цифровий датчик температури DS18B20**.

#### **Основні характеристики DS18B20:**

- **Діапазон вимірювання температури:** від -55°C до +125°C.
- **Точність:**  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  в діапазоні від -10°C до +85°C.
- **Інтерфейс зв'язку:** 1-Wire, що дозволяє підключати декілька датчиків до одного піну мікроконтролера.
- **Герметичне виконання:** Доступні моделі в нержавіючому корпусі з герметичною ізоляцією, що дозволяє використовувати їх у вологих та агресивних середовищах.

#### **Переваги DS18B20:**

- **Висока точність і стабільність вимірювань.**
- **Простота інтеграції** з мікроконтролером ATmega328 за допомогою готових бібліотек для Arduino.

- **Можливість розширення:** Підключення кількох датчиків на одну лінію для моніторингу температури в різних точках реактора.

#### 4.1.5. Вибір виконавчих механізмів

##### **Нагрівальний елемент:**

Було обрано **трубчастий електронагрівач (ТЕН)** потужністю 1000 Вт з нержавіючої сталі. ТЕН встановлюється у спеціальний теплообмінник або безпосередньо в реактор, забезпечуючи ефективну передачу тепла до субстрату.

##### **Переваги ТЕН:**

- **Висока ефективність нагріву.**
- **Довговічність** завдяки використанню матеріалів, стійких до корозії.
- **Простота керування:** Можливість регулювання потужності через ШІМ або реле.

##### **Циркуляційний насос:**

Для забезпечення рівномірного розподілу тепла використовується **відцентровий циркуляційний насос** з регульованою продуктивністю до 15 л/хв та напором до 4 м водяного стовпа.

##### **Переваги насоса:**

- **Забезпечення ефективної циркуляції** теплоносія в системі.
- **Можливість регулювання швидкості** потоку для оптимізації процесу нагріву.
- **Надійність** та тривалий термін експлуатації.

#### 4.1.6. Вибір реле та перетворювачів сигналу

Для керування нагрівальним елементом та насосом використовується **електромеханічне реле** з наступними характеристиками:

- **Номінальна напруга комутації:** 220 В АС.
- **Максимальний комутований струм:** 10 А, що забезпечує запас по струму для безпечної роботи.

- **Сигнал керування:** 5 В DC, що сумісний з виходами мікроконтролера через транзисторний ключ.

#### **Захисні елементи:**

- **Діоди шунтування (flyback diodes)** для захисту мікроконтролера від індуктивних перенапруг при вимкненні реле.
- **Оптрона розв'язка** може бути використана для додаткового захисту та відокремлення силової та керуючої частин.

#### 4.1.7. Комунікаційні інтерфейси

##### **Підключення датчиків температури:**

- Використовується інтерфейс **1-Wire**, що дозволяє підключати датчики DS18B20 до мікроконтролера ATmega328 з мінімальною кількістю проводів.
- **Підтягувальний резистор** номіналом 4,7 кОм використовується для забезпечення коректної роботи шини даних.

##### **Керування виконавчими механізмами:**

- **Цифрові виходи мікроконтролера** через транзисторні ключі керують реле, які вмикають або вимикають нагрівач та насос.
- **Аналогові виходи (ШИМ)** можуть бути використані для плавного регулювання потужності нагрівача за допомогою силового MOSFET-транзистора.

##### **Зовнішні комунікації:**

- Для віддаленого моніторингу та керування може бути додано модуль **ESP8266** або **ESP32**, який забезпечує бездротове підключення по Wi-Fi.
- **Інтерфейс UART** використовується для обміну даними між ATmega328 та Wi-Fi модулем.

#### 4.1.8. Система живлення та безпеки

##### **Блок живлення:**

- Стабілізований блок живлення на **5 В DC** з струмом до 2 А для живлення мікроконтролера та периферійних пристроїв.
- Окремий блок живлення для силових компонентів (нагрівач, насос) з врахуванням їх споживаної потужності.

#### **Заходи безпеки:**

- **Запобіжники** встановлюються на силових лініях для захисту від короткого замикання та перевантаження.
- **Заземлення** всіх металевих частин та корпусів для запобігання ураженню електричним струмом.
- **Використання захисних кожухів** та ізоляції на місцях підключення високовольтних компонентів.

#### 4.1.9. Програмне забезпечення

#### **Середовище розробки:**

використовується для програмування мікроконтролера ATmega328.

#### **Реалізація алгоритму нечіткої логіки:**

- Застосовано бібліотеку **Fuzzy** для Arduino, яка дозволяє реалізувати базові функції нечіткої логіки.
- Оптимізація коду проведена з метою зменшення використання пам'яті та підвищення швидкодії.

#### **Структура програмного забезпечення:**

1. **Модуль збору даних:** Зчитування температури з датчиків DS18B20 з використанням бібліотеки **OneWire** та **DallasTemperature**.
2. **Модуль обробки даних:** Реалізація алгоритму нечіткої логіки для обчислення керуючого впливу на основі поточної похибки та її зміни.
3. **Модуль керування:** Керування реле та нагрівачем через цифрові виходи мікроконтролера.
4. **Модуль комунікації:** При використанні Wi-Fi модуля, забезпечує обмін даними з віддаленим сервером або мобільним додатком.

#### 4.1.10. Інтеграція системи

##### Архітектура системи:

- **Мікроконтролер ATmega328** виконує функції збору даних, обробки та керування.
- **Датчики температури DS18B20** підключені до мікроконтролера через інтерфейс
- **Виконавчі механізми** (нагрівач, насос) керуються через реле, які підключені до цифрових виходів мікроконтролера.
- **Wi-Fi модуль** (опціонально) забезпечує віддалений доступ до системи.

##### Монтаж та підключення:

- Всі компоненти розміщуються на **платі прототипування** або друкованій платі для зручності монтажу та зменшення електромагнітних перешкод.
- **Кабелі та проводи** обираються з відповідним перерізом та ізоляцією для безпечної роботи.
- **Корпус** з захистом від пилу та вологи (ступінь захисту IP54 або вище) використовується для розміщення електроніки.

## Програмне забезпечення

Програмне забезпечення є ключовою складовою системи автоматизації керування температурним режимом біогазового реактора. Для забезпечення ефективного моніторингу та керування процесом було розроблено власну SCADA-систему (Supervisory Control and Data Acquisition), яка дозволяє в реальному часі відслідковувати параметри процесу, аналізувати дані та приймати керуючі рішення.

Розробка SCADA-системи здійснювалась з використанням веб-технологій: HTML, CSS, JavaScript, Canvas, бібліотеки Fabric.js для роботи з Canvas, Blockly для створення візуальних програм, та Socket.io для забезпечення двостороннього зв'язку між клієнтом та сервером.

## Вимоги до програмного забезпечення

Основні вимоги до програмного забезпечення:

1. **Реальний час:** Система повинна забезпечувати моніторинг та керування в реальному часі з мінімальною затримкою.
2. **Інтуїтивний інтерфейс:** Користувацький інтерфейс має бути зрозумілим та зручним для оператора.
3. **Масштабованість:** Можливість розширення функціоналу та підключення додаткових датчиків та виконавчих механізмів.
4. **Кросплатформеність:** Система повинна працювати на різних пристроях та операційних системах без необхідності встановлення додаткового ПЗ.
5. **Надійність та безпека:** Забезпечення захисту даних та стійкості до відмов.

## Архітектура програмного забезпечення

Архітектура програмного забезпечення базується на клієнт-серверній моделі з використанням веб-технологій.

- **Серверна частина:** Реалізована на мікроконтролері ATmega328 з підключеним модулем Wi-Fi (наприклад, ESP8266), який забезпечує зв'язок з клієнтською частиною через протокол WebSocket за допомогою бібліотеки Socket.io.
- **Клієнтська частина:** Веб-додаток, що виконується в браузері та забезпечує інтерфейс взаємодії з користувачем.

## Клієнтська частина

### Технології та інструменти

- **HTML та CSS:** Для структурування та стилізації веб-сторінок.
- **JavaScript:** Для реалізації логіки клієнтської частини та взаємодії з сервером.
- **Canvas API:** Для малювання графіки та візуалізації процесу на веб-сторінці.
- **Fabric.js:** Бібліотека для роботи з Canvas, що спрощує створення інтерактивних графічних елементів.
- **Blockly:** Відкрита бібліотека для створення візуального програмування, що дозволяє користувачу створювати логіку керування за допомогою блоків.

- **Socket.io**: Бібліотека для забезпечення реального часу та двостороннього зв'язку між клієнтом та сервером через WebSocket.

**Blockly** — це бібліотека з відкритим кодом, створена Google, яка дозволяє створювати інтерфейси для візуального програмування. З її допомогою можна створювати програми, додаючи блоки до робочої області. Користувачі можуть з'єднувати блоки, налаштовувати їх властивості та генерувати вихідний код на таких мовах програмування, як JavaScript, Python, PHP, Dart або Lua.

Основні компоненти Blockly:

### 1. Робоча область (Workspace)

Це головна зона, де користувач може перетягувати, додавати або видаляти блоки. Робоча область є інтерактивною і підтримує масштабування, перетягування та організацію блоків.

### 2. Блоки (Blocks)

Блоки є основою Blockly. Вони поділяються на кілька типів:

**хідні блоки**: отримують значення.

**локи логіки**: виконують умовні операції.

**локи циклів**: реалізують повторення.

**ункціональні блоки**: створюють функції або процедури.

**локи змінних**: дозволяють створювати змінні.

### 3. З'єднання (Connections)

Блоки мають спеціальні точки з'єднання (output/input), через які вони взаємодіють із іншими блоками.

### 4. Генерація коду

Blockly дозволяє перетворити створену візуальну програму у вихідний код, використовуючи спеціальні генератори для різних мов програмування.

### 5. Бібліотека блоків

Blockly постачається з базовим набором блоків, але дозволяє створювати користувацькі блоки, які адаптовані до потреб проекту.

**WebSocket** — це протокол зв'язку, що забезпечує постійне двостороннє з'єднання між клієнтом і сервером через єдиний TCP-сокет. WebSocket дозволяє обмінюватися даними між клієнтом і сервером у режимі реального часу з мінімальними затримками, що робить його ідеальним для додатків, які потребують швидкої взаємодії.

---

## Особливості WebSocket

### 1. Двостороннє спілкування

Клієнт і сервер можуть відправляти дані один одному без необхідності ініціації нового з'єднання.

### 2. Постійне з'єднання

Після встановлення з'єднання воно залишається активним, доки клієнт або сервер не розірве його.

### 3. Мінімальні накладні витрати

WebSocket використовує лише одне з'єднання через TCP, що значно знижує накладні витрати у порівнянні з HTTP-запитами.

### 4. Підтримка стандартів

WebSocket визначено стандартом RFC 6455, і його підтримують більшість сучасних веб-браузерів.

### 5. Шифрування

WebSocket може працювати через безпечний протокол (wss://), що забезпечує захист даних, аналогічний HTTPS.

---

## Архітектура WebSocket

### 1. Ініціація з'єднання

З'єднання починається з HTTP-запиту `Upgrade`, в якому клієнт запитує сервер перейти на WebSocket:

```
makefile
Копировать код
GET /chat HTTP/1.1
Host: server.example.com
Upgrade: websocket
Connection: Upgrade
```

Sec-WebSocket-Key: dGh1IHhnbXBsZSBub25jZQ==

Sec-WebSocket-Version: 13

## 2. Встановлення зв'язку

Сервер відповідає заголовком підтвердження:

```
makefile
```

Копировать код

```
HTTP/1.1 101 Switching Protocols
```

```
Upgrade: websocket
```

```
Connection: Upgrade
```

```
Sec-WebSocket-Accept: s3pPLMBiTxaQ9kYGzzhZRbK+xOo=
```

## 3. Обмін даними

Після встановлення зв'язку клієнт і сервер можуть обмінюватися повідомленнями в обидва боки.

## 4. Закриття з'єднання

Будь-яка зі сторін може ініціювати закриття з'єднання.

## Інтерфейс користувача

Інтерфейс складається з наступних основних елементів:

- **Панель моніторингу:** Відображає поточну температуру субстрату, графіки температури, стан виконавчих механізмів.
- **Панель керування:** Дозволяє задавати параметри системи, такі як задана температура, режими роботи.
- **Візуальний редактор логіки:** З використанням Blockly, користувач може створювати та модифікувати алгоритми керування без необхідності писати код.
- **Візуалізація процесу:** За допомогою Canvas та Fabric.js створюється інтерактивна схема біогазового реактора, де в реальному часі відображаються процеси та стан обладнання.

## Реалізація інтерфейсу з використанням Fabric.js

Fabric.js дозволяє легко створювати та маніпулювати об'єктами на Canvas. Приклад створення простого кола, що відображає температуру:

## Використання Blockly для візуального програмування

Blockly дозволяє користувачам створювати логіку керування шляхом складання блоків, що представляють різні команди та умови.

### Переваги використання Blockly:

- **Доступність для користувачів без досвіду програмування.**
- **Швидке створення та модифікація алгоритмів.**
- **Зменшення ймовірності синтаксичних помилок.**

Приклад створення блоку, що задає умову для вмикання нагрівача:

```
<block type="controls_if">
  <value name="IF0">
    <block type="logic_compare">
      <field name="OP">LT</field>
      <value name="A">
        <block type="variables_get">
          <field name="VAR">temperature</field>
        </block>
      </value>
      <value name="B">
        <block type="math_number">
          <field name="NUM">40</field>
        </block>
      </value>
    </block>
  </value>
  <statement name="DO0">
    <block type="text_print">
      <value name="TEXT">
        <block type="text">
          <field name="TEXT">Turn on heater</field>
        </block>
      </value>
    </block>
  </statement>
</block>
```

## Інтеграція Socket.io для реального часу

Socket.io використовується для забезпечення реального часу в додатку, дозволяючи клієнту та серверу миттєво обмінюватися даними.

Забезпечення безпеки та надійності

- **Авторизація користувачів:** Введення системи логіну та паролю для запобігання несанкціонованого доступу.
- **Шифрування даних:** Використання протоколу HTTPS для захисту переданих даних (при доступі через Інтернет).
- **Обробка помилок:** Реалізація механізмів виявлення та обробки помилок зв'язку між клієнтом та сервером.
- **Резервування даних:** Збереження історичних даних на зовнішніх носіях або в хмарних сервісах.

## 4.2. Цифрова система керування

Цифрова система керування (ЦСК) є основою для реалізації алгоритму керування температурним режимом біогазової установки з використанням мікроконтролерів Arduino та Raspberry Pi. Важливим етапом при розробці ЦСК є визначення оптимального періоду квантування (часу дискретизації), який забезпечує стабільність та високу якість керування, а також враховує обчислювальні можливості апаратних засобів.

### Аналіз динаміки об'єкта керування

Перш ніж визначити період квантування, необхідно проаналізувати динамічні властивості об'єкта керування, тобто біогазового реактора. Для цього розглянемо передавальну функцію об'єкта та визначимо його характерні часові константи.

З Розділу 2 відомо, що тепловий баланс реактора описується диференціальним рівнянням:

$$mc \frac{dT}{dt} = Q_{\text{bio}} + Q_{\text{ext}} - UA(T - T_{\text{env}})$$

де:

- $m$  — маса субстрату в реакторі;
- $c$  — питома теплоємність субстрату;
- $T$  — температура субстрату;
- $Q_{\text{bio}}$  — тепло, що генерується біохімічними реакціями;
- $Q_{\text{ext}}$  — потужність зовнішнього нагріву (керуючий вплив);
- $U$  — коефіцієнт теплових втрат;
- $A$  — площа поверхні реактора;
- $T_{\text{env}}$  — температура навколишнього середовища.

### Лінеаризація моделі

Для аналізу динамічних властивостей лінеаризуємо модель навколо робочої точки.

Позначимо:

- $Q_{\text{ext}0}$  — потужність нагрівача в робочій точці;
- $T_0$  — температура субстрату в робочій точці (наприклад, 40°C).

Введемо відхилення змінних:

$$\Delta T = T - T_0;$$

$$\Delta Q_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{ext}0}.$$

Лінеаризоване диференціальне рівняння матиме вигляд:

$$mc \frac{d\Delta T}{dt} = \Delta Q_{\text{ext}} - UA\Delta T$$

### Передавальна функція об'єкта

Перетворимо диференціальне рівняння у просторі Лапласа, приймаючи початкові умови рівними нулю:

$$mcs\Delta T(s) = \Delta Q_{\text{ext}}(s) - UA\Delta T(s)$$

Звідси отримуємо передавальну функцію об'єкта:

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta Q_{\text{ext}}(s)} = \frac{1}{mcs + UA}$$

Це є передавальна функція об'єкта першого порядку з постійною часу:

$$\tau = \frac{mc}{UA}$$

### Розрахунок постійної часу $\tau$

Підставимо відомі значення:

$$m = V\rho = 0.05 \text{ м}^3 \times 1000 \text{ кг/м}^3 = 50 \text{ кг};$$

$$c = 4180 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$U = 2.9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$A = 0.5 \text{ м}^2.$$

Тоді:

$$\tau = \frac{50 \times 4180}{2.9 \times 0.5} = \frac{209000}{1.45} \approx 144827.6 \text{ с}$$

Це приблизно 40 годин.

### Визначення періоду квантування за критерієм Найквіста

Для забезпечення стійкості та адекватного керування необхідно вибрати період квантування  $T_s$ , що задовольняє наступним умовам:

#### єорема Котельникова-Найквіста:

Частота дискретизації повинна бути щонайменше вдвічі більшою за максимальну частоту сигналу:

$$f_s \geq 2f_{\max}$$

### **критерій міжперіодного відношення:**

Згідно з практичними рекомендаціями для систем автоматичного керування, період квантування повинен бути в 10–20 разів меншим за постійну часу найшвидшого елемента системи:

$$T_s \leq \frac{\tau_{\min}}{10}$$

### **Розрахунок максимальних частот**

Оскільки об'єкт має постійну часу приблизно 40 годин, його максимальна частота:

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi\tau} \approx \frac{1}{2\pi \times 144827.6} \approx 1.1 \times 10^{-6} \text{ Гц}$$

Тоді мінімальна частота дискретизації за теоремою Найквіста:

$$f_s \geq 2 \times 1.1 \times 10^{-6} = 2.2 \times 10^{-6} \text{ Гц}$$

Відповідний максимальний період квантування:

$$T_s \leq \frac{1}{f_s} = \frac{1}{2.2 \times 10^{-6}} \approx 454545 \text{ с} \approx 126 \text{ годин}$$

Це означає, що з точки зору теореми Найквіста, ми можемо використовувати період квантування до 126 годин. Проте це надто великий період для практичного керування.

### **Вибір періоду квантування за критерієм міжперіодного відношення**

Застосуємо критерій:

$$T_s \leq \frac{\tau}{10}$$

Тоді:

$$T_s \leq \frac{144827.6}{10} = 14482.76 \text{ с} \approx 4 \text{ години}$$

Це максимальний рекомендований період квантування. Однак, для покращення якості керування та швидкості реакції системи, доцільно обрати ще менший період.

### **Вибір оптимального періоду квантування**

Враховуючи обчислювальні можливості мікроконтролерів та необхідну швидкість реакції системи, оберемо період квантування  $T_s=1$  хвилини=60. Цей вибір обґрунтований наступним:

- **Достатня швидкість реакції:** хоча процес повільний, можливі збурення (наприклад, зміна температури навколишнього середовища) можуть вимагати більш оперативного керування.
- **Можливості апаратури:** Arduino та Raspberry Pi здатні виконувати необхідні обчислення та обмін даними з такою періодичністю без перевантаження.
- **Моніторинг та запис даних:** Часті вимірювання дозволяють більш точно відслідковувати динаміку процесу та виявляти відхилення.

### **Перевірка обраного періоду квантування на стійкість**

Для цифрових систем керування важливо переконатися, що обраний період квантування не призведе до нестабільності системи.

### **Застосування Z-перетворення**

Передавальна функція об'єкта у безперервному часі:

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

Дискретизуємо об'єкт методом еквівалентного перетворення, використовуючи оператор передавання (перетворення Білліна):

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

Однак, оскільки постійна часу об'єкта значно більша за період квантування ( $\tau \gg T_s$ ), передавальна функція дискретизованого об'єкта буде мати полюс, близький до одиниці, що може викликати повільне зменшення перехідних процесів.

Обраний період квантування  $T_s=60$  є прийнятним для даної системи, забезпечуючи баланс між швидкістю реакції та обчислювальними можливостями апаратури.

#### **4.2.2. Дослідження цифрового регулятора**

У цьому підрозділі проводиться детальне дослідження цифрового регулятора, який реалізує алгоритм нечіткої логіки для керування температурним режимом біогазового реактора. Метою дослідження є оцінка ефективності цифрового регулятора, його стійкості та якості керування на основі реальних даних та умов експлуатації.

#### **Математична модель цифрового регулятора**

##### **Структура регулятора**

Цифровий регулятор складається з наступних основних компонентів:

**азифікація вхідних змінних:** Перетворення чітких вхідних значень (похибки та її зміни) у нечіткі множини за допомогою функцій належності.

**аза правил нечіткої логіки:** Набір експертних правил типу "Якщо... то...", що визначають керуючу дію.

**едукція:** Обчислення ступеня активації правил та формування нечітких виходів.

**ефазифікація:** Перетворення нечітких виходів у чіткий керуючий сигнал.

### **Вхідні та вихідні змінні**

**Вхідні змінні:**

- **Похибка температури  $e(k)$ :**

$$e(k) = T_{\text{зад}} - T(k)$$

Де  $T_{\text{зад}}$ — задана температура (наприклад, 40°C),  $T(k)$ — виміряна температура на кроці  $k$ .

**Зміна похибки температури  $\Delta e(k)$**

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1)$$

**Вихідна змінна:**

- **Керуючий вплив  $u(k)$ :** Потужність нагрівального елемента або сигнал для керування виконавчим механізмом.

### **Функції належності**

Для фазифікації використовуються трикутні функції належності.

Визначено наступні лінгвістичні терми:

- Для  $e(k)$  та  $\Delta e(k)$ :
  - (Negative Big) — сильно негативна
  - (Negative Medium) — середньо негативна
  - (Negative Small) — мало негативна
  - (Zero) — нульова
  - (Positive Small) — мало позитивна
  - (Positive Medium) — середньо позитивна
  - g) — сильно позитивна
- Для  $u(k)$ :

Приклад функції належності для терму **ZE** (нульова похибка):

$$\mu_{ZE}(e) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{e}{e_{\max}} \right|, & |e| \leq e_{\max} \\ 0, & |e| > e_{\max} \end{cases}$$

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

### 4.1. Функціонально-вартісний аналіз розробки.

Для прийняття раціонального та обґрунтованого рішення доцільно використовувати функціонально-вартісний аналіз (ФВА), що об'єднує різні методи колективного аналізу систем, творчого пошуку, оптимізації та вибору рішень [51].

ФВА базується на системному дослідженні структури функцій об'єкту, співставленні їх корисності та вартості реалізації з метою забезпечення необхідної корисності системи при мінімально можливих сукупних затратах.

Отже, прийняття рішень при ФВА здійснюється на основі двох критеріїв – корисності та вартості.

Структурний аналіз технічних і виробничих систем дозволяє виявити диспропорції в розвитку окремих складових, неузгодженість параметрів і взаємодії елементів, що суттєво може впливати на кінцеві показники функціонування системи в цілому [52].

Функціональна модель відображає впорядковану сукупність функцій системи і зв'язки між ними, що реалізуємо за допомогою методу аналізу функцій

fast (functional analysis system technique), використовуючи різні тестові запитання

(що? Навіщо? Як? Коли? Тощо). Наприклад для побудови функціональної моделі

технологічного процесу зручно використовувати запитання: „що необхідно для

здійснення функції і навіщо здійснюється дана функція ?” (рис. 4.1).

Структуризація і аналіз функцій передбачають виділення головної функції, що передбачає мету і призначення системи, основних функцій, без яких не може бути виконана головна, а також допоміжних і надлишкових.

Функціонально-вартісний аналіз проводимо для однієї із найбільш розповсюджених серед досліджуваних операцій – для процесу

приготування

біогазу.

Для подальшого вибору шляхів проектування системи визначали основні корисні функції (операції), які вона повинна відпрацьовувати при роботі, класифікували функції системи

Проведення ФВА базується на співвідношенні двох критеріїв:

корисності та вартості. Коефіцієнт корисності визначали шляхом побудови матриці пріоритетів за відомою методикою розрахунку.

При попарному порівнянні функцій у відповідних комірках матриці проставляють коефіцієнти переваг. Якщо при попарному порівнянні стрічка

має перевагу над стовпчиком, то коефіцієнт переваг приймають рівним 1.5, при їх однаковій значущості – 0.5, а при меншій – 1. Найбільш суттєво на величину енерговитрат на процес активної генерації біогазу впливають операція активного змішування.

## ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У ході виконання цієї роботи була розроблена комплексна система автоматизованого управління для контролю температурного режиму біогазової установки з використанням сучасних мікроконтролерів. Система включає використання мікроконтролерів Arduino для збору та обробки даних сенсорів, а також Raspberry Pi для реалізації центрального процесора, який управляє всім процесом з допомогою SCADA-системи. Було детально проаналізовано технічні характеристики об'єкта керування та побудовано математичну модель теплового режиму біореактора, яка дозволила адекватно описати процеси теплопередачі та теплоутворення. На основі отриманої моделі було обґрунтовано та вибрано алгоритм керування з використанням методів нечіткої логіки, що забезпечило підвищення стійкості та адаптивності системи в умовах змінних параметрів процесу.

Цифрова система керування, що була реалізована, передбачає автоматичне регулювання параметрів процесу, що дозволяє мінімізувати ручне втручання та підвищити ефективність роботи біогазової установки.

Інтеграція SCADA-системи на базі Raspberry Pi забезпечує можливість дистанційного моніторингу та керування, що сприяє підвищенню гнучкості та надійності експлуатації системи.

Перевагами розробленої системи є не тільки стабілізація температурного режиму, але й зниження енергоспоживання та підвищення продуктивності ферментації, що в кінцевому підсумку сприяє збільшенню обсягу виробленого біогазу. Запропонований підхід може бути впроваджений на сільськогосподарських підприємствах, що займаються переробкою

органічних відходів для отримання енергії, сприяючи підвищенню їх енергетичної незалежності та зниженню екологічних ризиків.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баадер В. Биогаз. Теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренидерферю. – М. : Колос, –1982. – 148 с.
2. Бурдейний Д. М. Підвищення ефективності біогазових установок / Д.М. Бурдейний, В.І. Шаталов // Збірник наукових праць ІМТ УААН «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві». – 2099. – № 1 (3,4). – С. 323 – 328.
3. Вербицький П. Вимоги Європейського Союзу до переробки відходів тваринного походження / П. Вербицький, В. Влізло // Ветеринарна медицина України. – 2008. – № 6. – С. 24 – 26.
4. Волошин М.Д. Дослідження процесів виділення біогазу з осадів стічних вод і свинячого гною / М.Д. Волошин, К.О. Клевцов, Н.В. Клевцова // Вопросы химии и химической технологии. – 2006. – № 5. – С. 117 – 120.
5. Гелетуха Г. Перспективи розвитку технологій отримання біогазу в Україні / Г. Гелетуха, С. Кобзар, К. Копейкін // Зелена енергетика. – 2001. – № 3. – С. 12 – 14.
6. Друкований М.Ф. Дослідження розчинення мінералу в біологічних добривах / М.Ф. Друкований, Л.В. Дишкант // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Земля України – потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави». – Вінниця, – 2014. – Том 2.
7. Друкований М.Ф. Комплекс біотехнологій – основа розвитку

аграрного сектору України / М.Ф. Друкований, Л.В. Дишкант //

Міжвідомчий

тематичний науковий збірник XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвячена пам'яті академіка П.М. Василенка. – Глеваха, 2013. – Випуск 98. – Том 2. – С.

145 – 151.

8. Друкований М.Ф. Основні напрямки розвитку, виробництва та використання біологічних палив у світі / М.Ф. Друкований, Л.В. Дишкант, І.М. Алексевиц // Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». – 2013. – Том 15. – №2. – С. 123 – 127.

9. Друкований М.Ф. Отримання високоякісних органічних добрив шляхом розчинення кальцієвмісної породи в біомасі / М.Ф. Друкований, О.С. Яремчук, Л.В. Дишкант, Н.Ф. Дорошкевич // Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Технічні науки. – 2014. – Випуск 2 (85). – С. 154 – 158.

10. Друкований М.Ф. Розчинення гірничних порід для підвищення якості біологічних добрив / М.Ф. Друкований, Л.В. Дишкант, А.І. Ольшевський, Н.Ф. Дорошкевич // Збірник наукових праць ВНАУ. Серія:

Технічні науки. – 2015. – Випуск 1 (89). – Том 2. – С. 51 – 54.

11. Друкований М.Ф. Технологічна лінія по виробництву біогазу та біологічних органічних добрив для вирощування екологічно чистої сільськогосподарської продукції / М.Ф. Друкований, Л.В. Дишкант // Збірник

наукових праць «Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків». – 2013. – Випуск 19. – С. 139 – 143.

12. Калетнік Г.М. Біопаливо / Г.М. Калетнік, В.М. Пришляк. – К :

Хай-Тек Прес, 2011. – 310 с.

13. Калетнік Г.М. Розвиток ринку біопалив в Україні / Калетнік Г.М.  
– К. : Аграрна наука, 2008. – 461 с.

14. Клименко В. Сільськогосподарські біогазові установки:  
закордонний досвід / В. Клименко // Техніка АПК. – 2006. – No 6 – 7. – С.  
20–24.

15. Ковалев А.А. Биогазовая установка для обработки помета /  
А.А. Ковалев, Е.В. Мартынов // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. –

– С. 31 – 32.