

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему **"РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ВИРОБНИЦТВА
БІОГАЗУ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ"**

Спеціальність:

174 - "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Шворов С.А.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Герасімов О.В.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Герасімову Олександрову Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність:

174 - "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Розроблення системи автоматичного керування температурним режимом виробництва біогазу в біогазовій установці",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "24" 10 2025 р. № 2518"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "29" травня 2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики бакалаврської кваліфікаційної роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Технологічна характеристика процесу виробництва біогазу із біологічних субстратів.

4.2. Дослідження БГУ як об'єкта автоматизації.

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Доцільність можливості використання домогосподарствами індивідуальних БГУ.

5. Перелік графічних документів:

- 5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування температурним режимом у біогазовій установці.
- 5.2. Система автоматичного керування температурним режимом у біогазовій установці. Фрагмент схеми електричної принципової.
- 5.3. Система автоматичного керування температурним режимом у біогазовій установці. Фрагмент схеми електричної з'єднань.
- 5.4. Система автоматичного керування температурним режимом у біогазовій установці. Фрагмент схеми електричної підключень.
- 5.5. Система автоматичного керування температурним режимом у біогазовій установці. Зовнішній вигляд щита керування.

Дата видачі завдання "25" жовтня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Шворов С.А.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Герасімов О.В.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень і скорочень	6
Вступ	7
РОЗДІЛ 1. Технологічна характеристика процесу виробництва біогазу із біологічних субстратів	11
1.1. Процес метаногенезу біомаси у БГУ	11
1.1.1. Промислова технологія отримання біогазу	11
1.1.2. Сировина для отримання біогазу	14
1.1.3. Класифікація та будова біогазових установок	16
1.2. Компоненти та принцип роботи біогазової установки	22
1.2.1. Системи подачі сировини	24
1.2.2. Біогазові реактори	27
1.2.3. Системи перемішування субстрату в біогазових реакторах	28
1.2.4. Способи нагрівання субстрату у біогазовому реакторі	32
1.2.5. Накопичення та очищення біогазу	34
1.3. Вимоги до систем автоматичного керування технологічними параметрами БГУ	35
РОЗДІЛ 2. Дослідження БГУ як об'єкта автоматизації	37
2.1. Біотехнічний процес метанового зброджування органічних відходів	37
2.2. Керування температурним режимом процесу анаеробного бродіння	39
2.3. Визначення динамічних властивостей біореактора та передатної функції для каналу керування температурою метанового зброджування	43
РОЗДІЛ 3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань	49
3.1. Функціональна схема автоматизації системи керування процесом виробництва біогазу	49
3.2. Визначення алгоритму керування температурним режимом в БГУ та вибір промислового регулятора	51
3.3. Вибір первинного вимірювального перетворювача	54
3.4. Вибір регулюючого органу та визначення його передатної функції	57
3.5. Вибір виконавчого механізму САК температурним режимом БГУ	62
РОЗДІЛ 4. Розробка цифрової системи керування	65
4.1. Визначення часу квантування сигналів ЦСК	65
4.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування	67

РОЗДІЛ 5. Схеми системи автоматизації	71
5.1. Розробка схеми електричної принципової системи керування температурним режимом у біогазовій установці	71
5.2. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу	77
5.3. Розрахунок і вибір пускозахисної апаратури та з'єднувальних проводів	79
РОЗДІЛ 6. Дослідження доцільності використання індивідуальних біогазових установок фермерськими господарствами	83
Висновки	95
Література	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- АПК – агропромисловий комплекс
- БГУ – біогазова установка
- БПК – термін, що визначає потребу мікроорганізмів у кисні для окислення органічної речовини у воді в аеробних умовах
- ЛЖК – леткі жирні кислоти
- НСХ – номінальна статична характеристика
- САК – система автоматичного керування
- с.м. – суха маса
- с.о.р. – суха органічна речовина
- ПДЕ – поновлювані джерела енергії
- у.п. – умовне паливо
- ХПК – термін, що визначає потребу кисню в окисленні всіх забруднюючих речовин у воді хімічно
- ЦСК – цифрова система керування
- SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition – Диспетчерське керування та збір даних

ВСТУП

Актуальність теми. У наш час потреба людства в енергетичних ресурсах зростає із року в рік. Висока вартість сировини (газу та нафти), і, як наслідок, похідних від них видів палива, стимулює активний пошук альтернативних джерел енергії. Сільське господарство є джерелом різноманітних цінних енергетичних компонентів у вигляді органічних відходів [1], оскільки щорічно світове виробництво продукції рослинництва і тваринництва накопичує тисячі тонн відходів, з яких можна отримати мільярди кВт електроенергії або мільярди м³ біогазу. Тому АПК може забезпечити енергетичну незалежність країни від централізованого використання природних ресурсів.

Виробництво енергії з відновлюваних джерел, включаючи біомасу (вуглецевомісткі органічні речовини рослинного і тваринного походження), динамічно розвивається у більшості Європейських країн. На сьогодні *поновлювані джерела енергії* (ПДЕ) покривають понад 10% енергоспоживання країн ЄС, у т.ч. біомаса – 6-7%, (більше половини). В окремих країнах частка біомаси у загальному споживанні первинних енергоносіїв суттєво перевищує середньоєвропейську і складає: у Фінляндії, яка є світовим лідером серед розвинених країн – 23%, у Швеції – 19%, у Данії – 14%, в Австрії – 12% [2].

Україна, з одного боку, має значний потенціал доступної для енергетичного використання біомаси. Економічно доцільний потенціал біомаси оцінюється у понад 28 млн. т у.п. на рік [3]. Основними складовими потенціалу є відходи сільськогосподарського виробництва, а також енергетичні культури. Використання цього потенціалу до виробництва енергії здатне задовольнити близько 13-15% потреби України у первинній енергії за теперішніх умов. Розвиток біоенергетичного сектора нашої країни повинен проходити обґрунтовано і послідовно і має враховувати можливий вплив на навколишнє середовище і національну економіку.

З іншого боку, в нашій країні існують фактори, які перешкоджають впровадженню сучасних методів переробки та утилізації відходів, зокрема: відсутність державної підтримки та повільне впровадження енергозберігаючих технологій (особливо в умовах воєнного стану); використання коштовних систем для переробки та утилізації відходів тваринництва та рослинництва; низька наукова обґрунтованість систематизації агропромислових відходів [4].

Досвід країн із розвиненою економікою свідчить про необхідність використання відходів сільського господарства. Так, на м'ясопереробних підприємствах є такі відходи, як кров, тельбухи, кістки, роги та копита, що використовуються для виробництва кормів, побутових миючих засобів, лікарських та косметичних препаратів. Гній використовують як добриво для ґрунту або для переробки його в електроенергію та тепло [5]. Відходи АПК хоч і є цінною сировиною для виробництва побутових, лікарських та інших біологічно активних засобів, але не завжди знаходять застосування, що призводить до необхідності створення умов для раціонального управління відходами. Класифікація відходів впливає на визначення подальших дій з ними (переробка у *біогазових установках* (БГУ), утилізація, продаж та ін.) [6].

Результуюча енергоефективність роботи підприємства визначається обраними діями щодо відходів виробництва. Основними відходами рослинництва є солома та/або листя рослин, рештки овочів, фруктів та стебла. До відходів тваринництва належать пташиний послід, гній ВРХ та свиней, підстилка з соломи та трави, пір'я, жир тварин та інше [5]. При цьому названі види відходів знаходяться у рідких або твердих фракціях і можуть бути використані для виробництва комбікормів та вітамінних домішок, або для отримання паливного матеріалу та біогазу (при зброджуванні у БГУ).

В сучасному сільськогосподарському виробництві переважну кількість вторинної сировини тваринництва використовують як органічне добриво для полів та переорюють їх в землю, але існують інші, більш прогресивні технології переробки. Первинна переробка вторинної сировини тваринництва є важливим напрямком розвитку новітніх енергозберігаючих технологій.

Сьогодні при переробці відходів сільського господарства масового розповсюдження набувають біогазові установки, які дозволяють отримувати біогаз (метан) та екологічно чисті добрива. Вироблений біогаз може бути використаним для обігріву будівель, та підігріву холодної води або для власних потреб підприємств (наприклад, отримання електроенергії за допомогою когенераційних установок).

В залежності від прийнятої технології переробки органічних речовин у біогаз, залишки від метанового бродіння є повноцінним добривом, яке схоже на мінеральне добриво за своїм складом, але з хімічної точки зору воно є менш агресивним за свіжий послід тварин та птиці та має менш різкий запах. До складу отриманих в результаті роботи БГУ добрив входять необхідні для якісної життєдіяльності рослин поживні речовини та мінерали, калій, азот, фосфор та ін. у легкодоступній формі.

Ще одним видом сировини для роботи БГУ є опале листя, гілки, відходи деревини та ін. Важливою задачею з точки зору збереження екології є раціональна утилізація органічних відходів урбанізованих середовищ – дерев, опалого листя, гілок, трави з міських парків тощо. Природний процес розкладання таких відходів є доволі повільний (залежно від вологості середовища може складати два роки і більше). Спалювання рослинної біомаси забруднює атмосферу, а утилізація органічних відходів на сміттєсховищах є витратним процесом [8,9,10].

Залежно від використаного виду субстрату для роботи БГУ, у залишках бродіння отримуються значні коливання поживних речовин. Але, у порівнянні із свіжим гноєм, у залишках бродіння в середньому вміст азотних речовин перевищує на 70%, а калію та фосфору – майже на 100%.

Отже, отриманий під час анаеробного зброджування органічних відходів сільського господарства біогаз, може бути використаним для отримання теплової та електричної енергії, що дозволить замінити біогазом частково або повністю такі викопні види палива, як вугілля, нафта та природний газ. Тому первинна переробка органічних відходів

сільськогосподарського виробництва є ефективним технологічним засобом, спрямованим на економічне застосування цінних компонентів у різних галузях виробничого та побутового життя нашої країни.

Об'єктом дослідження є процес виробництва біогазу в біогазових установках.

Предметом дослідження є закономірності і взаємозв'язки режимів функціонування БГУ та їх вплив на ефективність виробництва біогазу.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка системи автоматичного керування температурним режимом у біогазовій установці, яка забезпечить підвищення ефективності виробництва біогазу.

Для реалізації поставленої мети вирішуються наступні завдання:

1. Провести аналіз стану сучасних технологій утилізації відходів сільськогосподарського виробництва.

2. Розробити математичну модель керування температурним режимом в біореакторі.

3. Розробити функціональну схему автоматизації системи керування температурою в БГУ.

4. Обґрунтувати вибір комплексу технічних засобів автоматизації для реалізації системи керування та розрахувати показники якості її роботи, розробити систему автоматизації із операторським інтерфейсом SCADA-системи контролю та керування параметрами технологічного процесу виробництва біогазу.

5. Визначити економічну ефективність впровадження системи керування біогазовим реактором.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ІЗ БІОЛОГІЧНИХ СУБСТРАТІВ

1.1. Процес метаногенезу біомаси у БГУ

1.1.1. Промислова технологія отримання біогазу

Біогаз – це горюча газова суміш, що складається з $55 \div 70\%$ метану (CH_4), яка утворюється з органічних сполук протягом мікробіологічного анаеробного процесу. Також до складу біогазу входять $27 \div 44\%$ вуглекислого газу (CO_2) і невеликі кількості сірководню (H_2S), аміаку (NH_3), водню (H_2) та оксиду вуглецю (CO) (табл. 1.1).

Таблиця 1.1.

Фізико-хімічні властивості біогазу та його компонентів [10]

Показник	Складові біогазу				Біогаз (60% CH_4 + 40% CO_2)
	Метан CH_4	Вугле- кислий газ CO_2	Водень H_2	Сірко- водень H_2S	
Об'ємна частка, %	55-70	27-44	1	3	100
Теплота згоряння, МДж/м ³	35,8	-	110	22,3	17-23
Температура запалення, °С	650-950	-	585	-	650-950
Критичний тиск, МПа	4,7	7,5-304	1,3	89	7,5-8,9
Критична температура, °С	190,5	1,98	0,09	373	190,5
Нормальна щільність, г/см ³	0,72	468	31	1,54	1,2
Критична щільність, г/см ³	162	2,5	0,07	349	320
Відносна щільність (до повітря)	0,55			1,2	0,83

Енергетична цінність біогазу залежить від частки метану і в середньому складає 17-23 МДж/м³. З 1м³ гноївки можна отримати близько 20м³ біогазу з енергетичною цінністю 20-25 МДж/м³. Після виділення з біогазу двоокису вуглецю шляхом розчинення його у лужній воді можна отримати газ із вмістом до 95% метану, і у цьому випадку його енергетична цінність зросте до 36 МДж/м³. Очищений метан є неотруйним горючим газом без запаху і

кольору. За звичайних умов метан зріджується важко. У біогазі швидкість руху полум'я не перевищує 50 м/с. У суміші з повітрям біогаз є вибухонебезпечним (за умови, коли його частка складає від 5 до 15%). Октанове число біогазу $LO \approx 125$. Неочищеному біогазу характерний запах болота або ферми, завдячуючи чому легко відчутти його витік.

В основі роботи БГУ покладені біологічні процеси бродіння та розкладання органічних речовин під впливом метаноутворювальних бактерій в анаеробних умовах, які характеризуються відсутністю вільного кисню, високим рівнем вологості з певним температурним режимом (15-20°C для *психофільних*, 30-40°C для *мезофільних* і 50-70°C для *термофільних* бактерій) [11].

Біогаз у промислових обсягах отримують у керованому або некерованому режимі (рис. 1.1) [12].

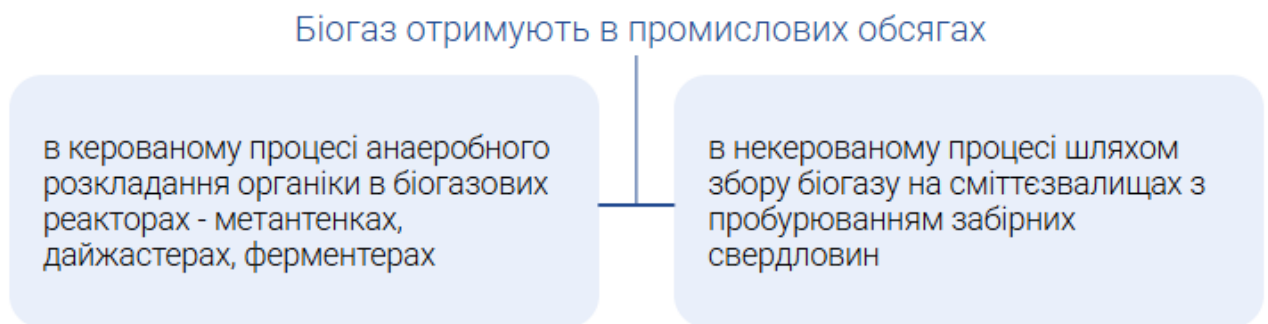


Рис.1.1. Режими отримання біогазу в промислових обсягах

Узагальнена технологічна схема отримання біогазу в біогазових установках наведена на рис. 1.2.

Головною задачею БГУ є її оптимізоване функціонування з метою виробництва максимально досяжних обсягів біогазу, яке проходить через основні *чотири стадії*, доки біогаз не перетвориться на електричну та/або теплову енергію. Більш детально технологічний процес виробництва біогазу поданий у 9 етапах на рис. 1.3.

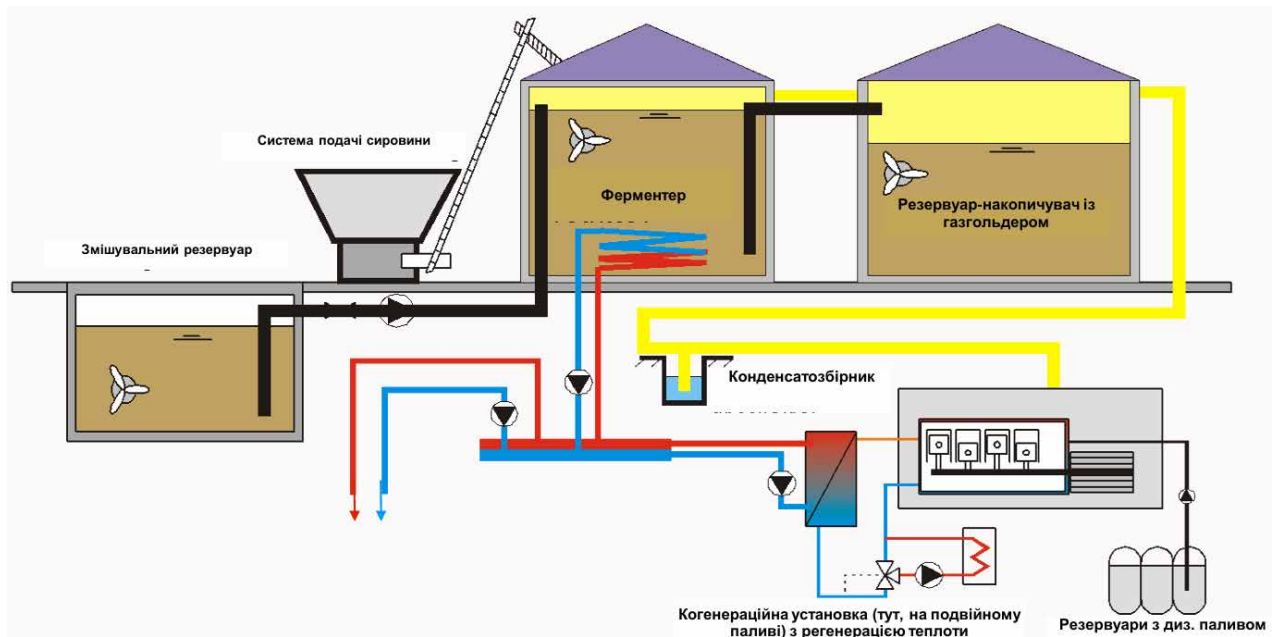


Рис. 1.2. Узагальнена технологічна схема отримання біогазу
в біогазових установках

Стадія №1: підготовка субстрату. Ефективне виробництво біогазу починається зі попередньої підготовки субстрату та його зберігання. У приймальному резервуарі сировина для виготовлення субстрат подрібнюється та гомогенізується. При цьому метанотворні організми отримують доступ до поживних речовин, які містяться у субстратах, що підлягають зброджуванню, а також додаються необхідні ензими. Ця початкова фаза необхідна для оптимізації наступних стадій виробництва.

Стадія №2: утворення біогазу (метаногенез). Біогаз утворюється в одній з головних складових БГУ – у біогазовому реакторі (метантенку), який забезпечує фізичну взаємодію субстрату або суміші субстратів, температури виробничого процесу та метаногенних мікроорганізмів. Виробництво біогазу здійснюється за наступних обов'язкових для забезпечення та підтримки умов: корпус біогазового реактора повинен бути максимально світло-, газо- та водонепроникним; змішувачі мають забезпечувати необхідний ступінь перемішування субстратів; інтенсивність перемішування не повинна шкодити життєдіяльності метаногенних організмів; температурний режим метаногенезу повинен бути постійним і забезпечуватись внутрішнім або зовнішнім

джерелом тепла; надійна теплоізоляція реактора повинна усувати виникнення теплових втрат та забезпечити оптимальні умови роботи БГУ.

Стадія №3: зберігання дегістату. В результаті метанового зброджування органічні відходи перетворюються на високоякісні органічні добрива – CO_2 –нейтральний *дегістат*, який накопичується і тимчасово (строком до 8-9 міс.) зберігається у відкритих або закритих резервуарах-сховищах, або в лагунах закритого типу.

Стадія №4: енергетична трансформація біогазу на теплову та/або електроенергію. Чим якісніше відбуваються процеси ферментації, тим вищий вихід газу матиме біогазова установка і тим більше енергії можливо одержати шляхом спалювання біогазу у когенераційній установці.

Схему дев'яти етапів технологічного процесу промислового виробництва біогазу наведено у додатку А1 [12].

1.1.2. Сировина для отримання біогазу

За видами сировини, яка використовується для виробництва біогазу, БГУ поділяються на основні дві категорії. До першої відносять установки, де для метаногенезу використовують відходи переробної промисловості та стічні води, до другої – вторинні відходи сільськогосподарського виробництва. Слід також зазначити, що все більшого розповсюдження набувають установки, де реалізовано концепцію техніко-технологічного вирішення проблеми сумісного використання органічних відходів тваринництва та біомаси рослинного походження в БГУ [10].

Так, застосування виключно рослинної сировини як основного або єдиного компонента субстрату бродіння багато дослідників вважають недоцільним, оскільки на практиці отримання або закупівля рослинних матеріалів пов'язане із певними затратами, що можуть звести нанівець рентабельність використання БГУ [13]. Тому одним з перспективних методів підвищення ефективності роботи БГУ закордонні фахівці вважають анаеробне

зброджування субстратів, які являють собою суміш коферментів та гноївки сільськогосподарських тварин. У ролі коферментів запропоновано застосовувати ті відходи харчової переробки або рослинництва, що наявні у господарстві – кормові залишки, солому, зелену масу з газонів, пил з млинів і т.п. Багато німецьких фахівців з виробництва біогазу скептично відносяться до відсутності використання гноївки у коферментаційних установках – вона містить важливі мікроелементи, без яких бродіння протікає нестабільно [14].

Таблиця 1.2.

Добовий вихід біогазу залежно від типу сировини
та добової кількості завантаження

Сировина для метаногенезу	Питомий вихід газу (м ³ на 1 кг сухої речовини)	Частка метану (CH ₄), %
<i>Суха рослинна сировина</i>		
Солома:		
- пшениці	0,20 – 0,30	50-60
- жита	0,20 – 0,30	59
- вівсу	0,29 – 0,31	59
- ячменю	0,25 – 0,30	59
- кукурудзи	0,38 – 0,46	59
Льон	0,36	59
Конопля	0,36	59
Листя соняшника	0,30	59
Конюшина	0,43 – 0,49	52
<i>Тваринний гній</i>		
Пташиний послід	0,31 – 0,62	60
Гній:		
- великої рогатої худоби	0,25 – 0,34	63
- свиней	0,34 – 0,58	65-70
- коней	0,20 – 0,30	56-60
- овець	0,30 – 0,62	70
<i>Відходи господарської діяльності</i>		
Стічні води та фекалії	0,31 – 0,74	70
Бурячиння	0,40 – 0,50	85
Картопляне бадилля	0,28 – 0,49	60-75
Відходи овочівництва	0,33 – 0,50	50-70
Трава	0,28 – 0,63	70
Опале листя з дерев	0,21 – 0,29	58

Одним з визначальних факторів вибору сировини для виробництва біогазу для конкретного господарства є його спеціалізація: чи буде використана чиста рослинна біомаса, або суміш із відходами тваринництва, птахівництва і т.д.

Продуктивність БГУ визначається кількістю добутого біогазу. В свою чергу, вихід біогазу залежить від складу субстрату (суміші для зброджування), попередньої його підготовки, якості керування параметрами та режимами процесів анаеробного зброджування на оптимальному рівні [15,16].

Із урахуванням даних різних досліджень, у таблиці 1.2 наведені орієнтовні показники для розрахунку добового виходу біогазу залежно від типу сировини та добової кількості завантаження [17].

Окрім того, що найчастіше як поновлювану рослинну сировину для БГУ використовують кукурудзу через велику кількість енергії з одиниці площі, проводять випробування так званих «енергетичних» рослин, таких як цукрове сорго, просо, суданська трава, цукровий буряк та ін.

1.1.3. Класифікація та будова біогазових установок

У закордонній та вітчизняній літературі біогазові установки, де відбувається анаеробне зброджування органічних субстратів, класифікують за різними критеріями [10,18,19].

За *сферою застосування* БГУ розрізняють для:

1. Приватних домогосподарств та дрібних ферм (рис. 1.3). Вони розраховані на вироблення біогазу із власної внутрішньої сировини – гною або субстратів на його основі. При цьому зброджена маса використовується як органічне добриво, а отриманий біогаз використовується для забезпечення внутрішніх потреб домогосподарства в опаленні та електроенергії.

2. Станцій очищення стічних вод із ферментерами баштового типу (рис. 1.4, а). У більшості розвинених країн однією із найважливіших сфер застосування анаеробної ферментації є анаеробна стабілізація стічних вод.

Ферментери баштового типу є складовими частинами станцій очищення комунальних стічних вод.



Рис. 1.3. БГУ для приватного домогосподарства

Перевагами такого використання БГУ є: 1) отриманий біогаз повністю використовується для власних потреб водоочисної станції; 2) забезпечується ефективне видалення мулу, який насичений піском; 3) отриманий після обробки стічних вод осад можна використовувати як органічне добриво; 4) для збільшення кількості виробленого біогазу можна додавати інші рідкі відходи. До *недоліків* відносять значні капіталовкладення у будівництво таких споруд та високу чутливість до наявних твердих речовин.



а)



б)

Рис. 1.4. Муніципальна БГУ для очищення стічних вод (а) та комплекс для анаеробної очистки промислових стічних вод від органічних відходів (б)

3. Станцій для очищення промислових стічних вод від органічних забруднень (рис. 1.4, б). Основною метою використання установок із таким типом ферментерів є ефективна обробка стічних вод, а не отримання енергії.

Широкого розповсюдження набули ферментери типів UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket) та Fixed-bed. До *переваг* таких установок відносять: 1) високу ефективність розщеплення органічних забруднень, оскільки досягається скорочення рівнів ХПК та БПК відповідно до 95% та 98%; 2) скорочення тривалості зброджування завдяки інтенсивному накопиченню колоній бактерій; 3) зменшення витрат на наступне аеробне очищення стічних вод. *Недоліком* таких установок є необхідність видалення будь-якої твердої фракції перед зброджуванням, оскільки переробці підлягає лише розчинна органіка.



а)



б)

Рис. 1.5. Установка для ферментації та отримання біогазу із рослинних енергетичних культур та тваринного посліду (а) та для обробки відсортованих органічних відходів домогосподарств та промисловості (б)

4. Для ферментації та отримання біогазу із рослинних енергетичних культур та тваринного посліду (рис. 1.5, а). Головною особливістю таких БГУ є повний цикл зброджування (від гідролізу до метаногенезу), який здійснюється зазвичай в одному резервуарі. Такі установки набули найбільшого поширення у сільському господарстві. Наприклад, у Німеччині налічується приблизно 9 500 таких установок із встановленою потужністю від 0,03 до 20 МВт [18]. До головних *переваг* цих установок відносять: 1) порівняно низькі капіталовкладення, простоту конструкцій реакторів із мішалками; 2) частка с. р. у вхідній сировині може складати до 13%. Недоліки

таких установок: 1) порівняно низька швидкість зброджування внаслідок наявності твердої фракції; 2) сировина перебуває у реакторі набагато довше, ніж у системах очистки стічних вод; 3) потреба у додаткових енерговитратах на роботу насосів та мішалок.

5. Для обробки відсортованих органічних відходів домогосподарств та промисловості (рис. 1.5, б). Для переробки вказаних відходів має бути забезпечена висока ступінь готовності БГУ та реалізація двоступеневого процесу, оскільки необхідність стабілізації субстрату вимагає максимізації можливого рівня зброджування. До *переваг* таких установок належать: 1) отримання більш якісного складу біогазу (більшу частку метану); 2) при видаленні сторонніх домішок та при здійсненні знезараження можна досягти розкладання субстрату на 85%; 3) у порівнянні із БГУ із одноступеневим збродженням за однаковий час отримується на 25% більше біогазу; 4) моноферментація – легкість ферментації органічних решток харчової промисловості. *Недоліком* таких установок є: 1) більші капіталовкладення порівняно з БГУ із одноступеневим збродженням та значні операційні витрати; 2) складним технологічним процесом є видалення сторонніх домішок та фаза знезараження сировини.

6. Для сухої ферментації із порційним завантаженням (рис. 1.6, а). Оскільки тільки розчинена у воді органічна сировина може бути ферментованою, інколи використовують зрошувальні ферментери гаражного типу. Їм притаманні такі *переваги*: 1) низькі операційні витрати внаслідок простоти процесу; 2) низьке енергоспоживання; 3) порівняно невелика частка сірководню (H_2S) в отриманому біогазі; 4) може бути зброджена волога штабельована частина твердої сировини без попередньої обробки. *Недоліки*: 1) виключно порційне завантаження та тривалий час перебування субстрату в реакторі; 2) менший вихід біогазу порівняно із зброджуванням рідких субстратів; 3) 50% вмісту ферментера потрібен як інокулят для наступної свіжої порції сировини.



а)



б)

Рис. 1.6. Зрошувальний ферментер гаражного типу із порційним завантаженням (а) та ферментер (відстійник) типу "лагуна"

7. У регіонах, де наявні великі земельні площі, а також рівень ґрунтових вод дозволяє встановлювати такі системи, використовуються ферментери типу "лагуна" (рис. 1.6, б). Такі "лагуни" не мають теплоізоляції і вкриті лише спеціальною плівковою мембраною. До таких ферментерів не висуваються особливі вимоги і не очікується отримання великої кількості та якісного біогазу. *Переваги:* 1) відносна висока стабільність процесів зброджування; 2) дешева конструкція та вільний доступ до ферментера для його очищення; 3) за наявності змішувачів та системи підігріву (або високих температур навколишнього середовища) можливо отримати промисловий рівень продуктивності. Недоліками використання таких ферментерів є залежність від погодних умов; займання значних площ земельних ділянок; ускладнена можливість оснащення системами перемішування; низький вихід біогазу ($0,2 - 0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$).

За *типом технологічної схеми завантаження – вивантаження субстрату:*

- безперервної дії;
- періодичної дії.

За *продуктивністю* БГУ розрізняють за об'ємом біореактора:

- великі (промислові) із об'ємом реактора більше 200 м^3 ;

- середні (об'єм реактора у межах від 50 до 200м³);
- малі (об'єм реактора менше 50м³).

Одним із основних параметрів роботи БГУ є *температурний режим зброджування субстрату*. За цим параметром установки поділяють на:

- психрофільні (20 – 25°C);
- мезофільні (30 – 35°C);
- термотолерантні (40°C) [18];
- термофільні (50 – 55°C).

За *конструктивними особливостями* БГУ можуть бути:

- одно-реакторні;
- багато-реакторні.

Ферментери БГУ за *типом використаного субстрату* поділяють на:

- ферментери для вологого субстрату (рис. 1.7);
- ферментери для сухого субстрату (рис. 1.8).



Рис. 1.7. Ферментери для "вологого" субстрату



Рис. 1.8. Ферментери для "сухого" субстрату

При цьому процеси зброджування у ферментерах із "вологою" ферментацією характеризуються безперервністю процесу, а у ферментерах із "сухою" ферментацією процес може протікати як безперервно, так і періодично (Додаток А2).

Форма біореактора може бути: 1) яйцеподібною; 2) циліндричною; 3) кубічною; 4) траншейною; 5) еластичною (додаток А3).

Розміщення резервуара БГУ може бути 1) горизонтальне; 2) вертикальне.

За типом матеріалу, з якого виготовлена БГУ, установки можуть бути 1) склопластиковими; 2) металевими; 3) бетонними.

За типом перемішування субстрату БГУ поділяються на установки з: 1) механічним перемішуванням; 2) гідравлічним перемішуванням; 3) барботажним перемішуванням.

За типом нагрівачів субстрату БГУ бувають: 1) із нагрівом гарячою водою; 2) із нагрівом паром під тиском; 3) із електронагрівом.

1.2. Компоненти та принцип роботи біогазової установки

Розглянемо типову одноступеневу установку (без гідролізу біомаси) (рис. 1.2, 1.9), яка складається із комплексу споруд і технологічного обладнання, що інтегровані в єдину систему із автоматизованою системою керування процесом метанового зброджування.

Така БГУ вирізняється конструктивною простотою, високим рівнем стандартизації, і зазвичай складається з таких основних компонентів:

- системи накопичення і подачі сировини у біогазовий реактор;
- головного реактору (допоміжні реактори використовуються для двоступеневих БГУ);
- газгольдеру (обладнання для накопичування біогазу);

метою уникнення теплових втрат біореактор має зовнішню теплоізоляцію. Субстрат постійно перемішується за допомогою перемішувачів (3) із повільною швидкістю обертання для дбайливого і повного перемішування. В залежності від фізико-механічних властивостей субстрату, використовують різні види систем перемішування (див. п.1.2.3).

Вивантаження зброженого субстрату здійснюється з такою ж періодичністю, як і завантаження, в автоматичному режимі.

Біогаз збирається в газгольдері (6). Газгольдер (6) використовується в якості газонепроникного покриття ферментера і виконує функцію накопичувача газу. Зовнішній купол (7) є надзвичайно розтяжним, має високу стійкість до сонячного випромінювання із вогнестійкою структурою. Конструкція БГУ передбачає високу еластичність цього елемента і його надійну фіксацію. Відводиться біогаз трубопроводом (8), який оснащений пристроями для відведення конденсату і запобіжними пристроями, що захищають газгольдер (6) від перевищення допустимого тиску. З газгольдера біогаз безперервно подається в когенераційну установку або систему очищення біогазу.

Дегістат подається на сепаратор (9). Система механічного поділу працює від 4-6 разів на добу і розділяє залишки бродіння після ферментера на тверді та рідкі біодобрива.

Керування роботою складових компонентів БГУ відбувається згідно із алгоритмом роботи, який закладений у систему автоматики (11).

1.2.1. Системи подачі сировини

Типовими прикладами систем подачі сировини є: 1) приймальні резервуари; 2) системи подачі твердого субстрату; 3) буферні ємності; 4) завантажувачі воронкового типу; 5) конвеєрні завантажувачі.

Приймальні резервуари (рис. 1.10) зазвичай використовуються для установок ферментації органічних відходів. У деяких випадках у ньому залишають сировину для подрібнення та змішування перед резервуаром-

накопичувачем, у деяких випадках – як бункер перед видаленням домішок та забруднювачів.



Рис. 1.10. Приймальні резервуари систем подачі сировини

Системи подачі твердого субстрату (рис. 1.11) найчастіше використовуються для подачі твердої сировини безпосередньо до ферментера і часто є комбінацією буферної ємності з системою відбору та системи транспортування твердої сировини конвеєрного типу. Зазвичай, застосовуються при зброджуванні сільськогосподарських відходів: пташиного посліду, гною ВРХ та свиней, енергетичних культур, продукції овочівництва.



Рис. 1.11. Система подачі твердого субстрату

Буферні ємності систем подачі сировини (рис. 1.12) призначені для короткочасного зберігання сировини – до 1 доби. Для подачі сировини на конвеєр застосовуються ланцюги, шнеки або гідравлічні барабани. Внаслідок

високого ступеня зносу для таких установок необхідно забезпечити підвищений запас міцності матеріалів конструкцій.



Рис. 1.12. Буферні ємності систем подачі сировини в БГУ

Завантажувачі воронкового типу (рис. 1.13) є альтернативою для традиційних змішувальних резервуарів.

Вони використовуються для змішування твердого субстрату із рідиною і підходять для будь-якої технології ферментації. Оскільки тверда фракція не пресується, досягається точність дозування та швидке розкладання субстрату. У разі роботи з твердим субстратом необхідна буферна ємність (чутливі до каміння та твердих домішок у складі субстрату).

В *конвеєрних системах подачі сировини* (рис. 1.14) переважно використовуються шнеки або їх поєднання із ланцюговими конвеєрами. Ключовим для таких систем є вибір матеріалу виготовлення шнеків: якщо сировина – енергетичні культури та органічні відходи, необхідно використати нержавіючу сталь (наприклад, марки AISI 316).



Рис. 1.13. Завантажувачі воронкового типу



Рис. 1.14. Конвеєрні (шнекові) системи подачі сировини

1.2.2. Біогазові реактори

Процес анаеробного зброджування протікає у герметичному резервуарі – *біогазовому реакторі* (або метантенку), який є основним елементом будь-якої БГУ, тому до його конструкції висуваються доволі жорсткі вимоги. Корпус біогазового реактора повинен мати дуже міцну конструкцію із абсолютною герметичністю його стінок. Корозійна стійкість та надійна теплоізоляція стінок є обов'язковими умовами. Водночас при проектуванні БГУ повинні передбачатися системи завантаження та вивантаження реактора при обраній технології, а також забезпечений доступ до внутрішнього простору для технічного обслуговування.

При виборі типу та розміру біогазового реактору стандартного підходу не існує, він повинен ґрунтуватись на наступних конкретних умовах: 1) частка сухої речовини у сировині; 2) об'єм сировини за рік, що підлягає переробці; 3) чи піддається сировина перемішуванню та/або перекачуванню насосом, що впливає на розподіл сировини в об'ємі резервуара; 4) наявна можливість капітальних втрат на будівництво БГУ.

Виходячи з електричної потужності блочної силової котельної БГУ, визначається потреба в площі для зброджування. Наприклад, для гноївки ВРХ встановлено показник у 10м^3 на 1 кВт електричної потужності. Біогазова установка для зброджування кукурудзи і трав'яної маси з електричною потужністю від 100 кВт потребує об'єму метантенка від 400 до 600м^3 [21].

Наземні або підземні біореактори виготовляються зі сталі або склопластику, з бетонних блоків невеликого розміру або наливного бетону. Також доцільно комбінувати залізобетон та високоякісну сталь у верхній частині реактора, де накопичується газ, завдяки чому від початку експлуатації можна уникнути пошкодження корозією бетону. На вибір матеріалу впливають величина тиску всередині установки та його вартість.

Конструкції деяких поширених типів біореакторів, їх характеристики і недоліки, наведені у додатках А4 – А10.

1.2.3. Системи перемішування субстрату в біогазових реакторах

Сировина в реакторі в процесі протікання реакції має тенденцію розділятися на фракції. На дні реактора скупчується нерозчинний осад, більш легкі частинки, що захоплюються бульбашками газу, піднімаються наверх і утворюють кірку. Все це істотно уповільнює швидкість реакції. Для того, щоб реакція протікала рівномірно і ефективно, масу всередині реактора необхідно час від часу перемішувати.

За допомогою систем перемішування вирішуються наступні задачі:

- *Дотримання однорідної структури субстратних сумішей.*

При цьому здійснюється запобігання осаджуванню субстрату на дно біореактора та появи кірки на поверхні субстрату.

- *Підтримання однорідності розподілу свіжого субстрату* по усьому об'єму ферментера, що стимулює роботу наявних мікроорганізмів у субстраті.

- *Врівноваження температурного поля* по усьому об'єму ферментера за рахунок улаштування систем підігріву субстрату, конструктивне виконання яких не заважає процесу перемішування.

- *Підвищення виходу біогазу* при забезпеченні оптимальних режимів перемішування наявного типу сировини для приготування субстрату.

Перемішування хімічно активної маси всередині герметичного реактора є непростим завданням. Перемішуючі деталі повинні бути зроблені зі стійкого до корозії матеріалу. Привід перемішуюча повинен перебувати або всередині реактора, або необхідно застосувати високоякісну перехідну муфту. Можна також застосувати гідравлічне або пневматичне перемішування.

Розглянемо стандартні технічні рішення, що найчастіше використовуються для улаштування систем перемішування субстрату.

- 1) Занурені мішалки з електроприводом для горизонтальних ферментерів (рис. 1.15). Улаштування таких систем перемішування субстрату є порівняно недорогими, але й недовговічними внаслідок прямого контакту із хімічно активним середовищем. Оскільки перемішувачі з електроприводом занурюються у середовище, їх зручно пристосовувати до ферментерів різного розміру – легко варіюються глибина занурення та кут перемішування. Оскільки їх електроприводи є високо-обертливими, такі системи працюють періодично. Окрім недовговічної роботи, такі системи мають інші суттєві недоліки. По-перше, це важкість отримання ретельно перемішаного субстрату внаслідок волокнистої структури субстрату та наявності твердих речовин. По-друге, оскільки ТО та ремонт обладнання вимагає відкриття ферментера, навколишнє середовище забруднюється викидами, що погіршує екологію. По-третє, висуваються високі вимоги до безпеки праці персоналу, який здійснює ТО та демонтаж обладнання системи перемішування.

2) Мішалки бокового кріплення для горизонтальних ферментерів (рис. 1.16). В таких системах електропривод встановлюється назовні ферментера, що дозволяє здійснювати ТО та ремонт електрообладнання без відкриття ферментера. Висота встановлення та кут перемішування є фіксованим, а режим роботи – періодичний перед або під час завантаження сировини. Для підвищення ефективності перемішування субстрату часто встановлюються у парі із зануреними мішалками.

3) Лопатеві мішалки для горизонтальних ферментерів (рис. 1.17).

Ефективність від їх використання та режими роботи є подібними до мішалок попереднього типу із тою різницею, що вони ефективніше розбивають плаваючі шари субстрату.

4) Мішалки верхнього кріплення для вертикальних ферментерів (рис. 1.18). Системи такого типу мають ряд істотних переваг над описаними вище. Зазвичай для керування електроприводом мішалок цього типу використовують частотні перетворювачі, що забезпечує зниження споживання електроенергії та безперервність їх роботи (24 години на добу) із низькою швидкістю обертання (від 13 до 18 об./хв.). Встановлення електроприводу ззовні ферментера забезпечує зручність ТО. Потужність електроприводу для відносно великих ферментерів варіюється у межах від 11 до 30 кВт. Вказані переваги забезпечують ретельне перемішування субстрату із відсутністю розшарування субстрату на фракції. До недоліків цієї системи перемішування слід віднести можливість виникнення осаду на дні ферментера та вірогідність механічної руйнації валу або болтових кріплень.

1.2.4. Способи нагрівання субстрату у біогазовому реакторі

Переробка біомаси з використанням мікроорганізмів є доволі тривалим та трудомістким процесом, інтенсифікація якого досягається шляхом підбору наступних технологічних параметрів: температура зброджуваної маси, кислотність, концентрація, об'єм поживних речовин [22]. З наведених

технологічних параметрів найбільш впливовим чинником є температура – її зростання веде до швидшого розкладу органічних речовин, а раптове зниження до зменшення метаболічних процесів та виходу біогазу [23].

Вплив температурного режиму на протікання анаеробного процесу суттєво відрізняється залежно від типу сировини та її фізико-хімічних властивостей. Для рослинних відходів оптимальна температура зброджування 30–35°C, стічних вод – 30–40°C, гною – 37–40°C [23].

Мезофільний режим бродіння характеризується найвищою активністю метаногенних бактерій з максимальним утворенням біогазу при температурі бродіння 35°C [18].

У роботі [24] у результаті дослідження впливу зміни температури на продуктивність біореактора і життєдіяльність бактерій встановлено, що життєдіяльність метанових бактерій відбувається при температурі у межах від 0 до 70°C. Різке зниження або різке підвищення температури створює тривожну дію на бактерії, що призводить до зменшення виходу біогазу. Таким чином, зі зростанням температури підвищуються вимоги до допустимих меж коливання температури для оптимального виділення біогазу:

- психрофільний температурний режим $\pm 2^{\circ}\text{C}$ за годину;
- мезофільний $\pm 1^{\circ}\text{C}$ за годину;
- термофільний $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ за годину [24].

Тому температура відіграє важливу роль у кількості та якості біогазу, що виробляється з одного кілограма органічної с.о.р. за період ферментації у реакторі БГУ.

Для забезпечення підігрівання субстрату у БГУ застосовують два методи підігріву: прямий, за допомогою гарячої води або пари (рис. 1.19), та непрямий нагрів за допомогою різноманітних теплообмінників (рис. 1.20).

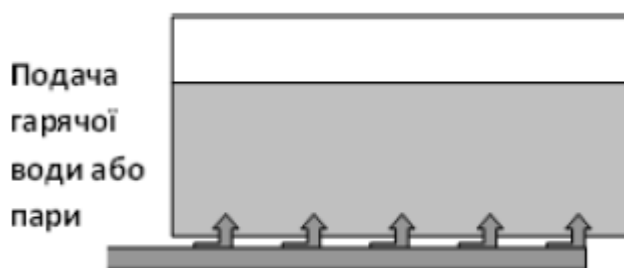


Рис. 1.19. Схема прямого підігріву субстрату за допомогою води або пари

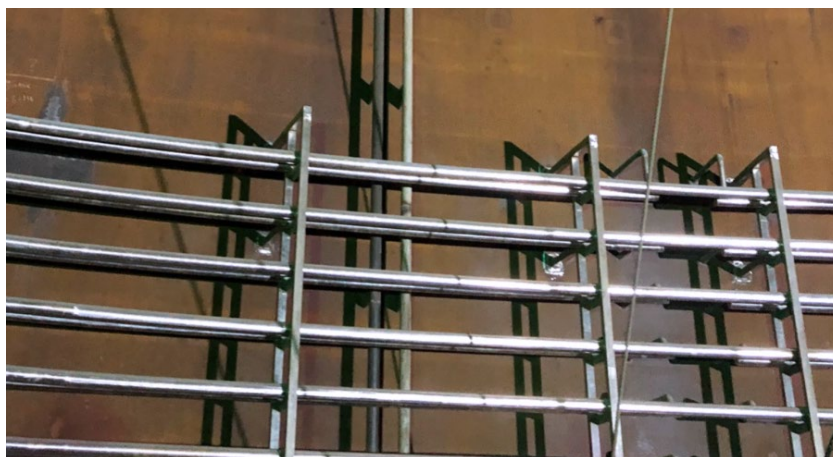


Рис. 1.20. Приклад улаштування непрямого підігріву субстрату за допомогою нагрівальних труб, розташованих на стінках реактора

Прямий підігрів. Для забезпечення встановленого режиму ферментації субстрат перемішують з гарячою водою (температура води 35 – 40°C).

Непрямий підігрів. Непрямий підігрів здійснюється за допомогою теплообмінників, які розташовуються в залежності від форми реактора, типу перероблюваної сировини та способу експлуатації установки, всередині або зовні реактора.

В якості нагрівальних елементів застосовують теплообмінники у вигляді змійовиків, секцій радіаторів, паралельно зварених труб, шлангів та плоских теплообмінників, де теплоносієм служить гаряча вода з температурою близько 60°C. Використання більш високих температур теплоносія підвищує ризик налипання частинок субстрату на поверхню теплообмінника, що призводить до зниження тепловіддачі. З метою уникнення процесу налипання та осідання твердих частинок субстрату на теплообмінних апаратах, останні

рекомендують встановлювати максимально близько до перемішуючих пристроїв.

Джерелом теплової енергії може бути частина виробленого біогазу (25...35%), гаряча вода від котельні, або використовується для нагрівання води електрична енергія, отримана з мережі або від вітрових електростанцій.

1.2.5. Накопичення та очищення біогазу

Накопичення біогазу. Вироблений біогаз накопичується у газгольдері (від англ. *gas holder*). Газгольдер в БГУ виконує також функцію стабілізатора тиску газу і буфера при заправці реактора і зливі добрив. У великих БГУ газгольдером виступає сам реактор, який закривається зверху спеціальною гумовою мембраною. Робочий об'єм такого газгольдера не великий, але у великих БГУ немає перепадів у споживанні газу, оскільки весь газ відразу переробляється в електричну або теплову енергію. У малих і середніх БГУ споживання біогазу є нестабільним і важко передбачуваним, тому бажано, щоб робочий об'єм газгольдера відповідав продуктивності БГУ за 1,5-2 години. Також бажано, щоб робочий об'єм газгольдера більш ніж у два рази перевищував обсяг одноразової заправки або зливу сировини. Для малих і середніх БГУ зазвичай застосовують мокрі і сухі газгольдери. Мокрий газгольдер має помітно більшу вартість і складність в експлуатації, ніж сухий, виготовлений з сучасних синтетичних матеріалів.

Очищення біогазу. Сучасні теплоенергетичні модулі вимагають очищення біогазу від баластних речовин (води, двоокису вуглецю CO_2 , сірководню H_2S , аміаку NH_3 та ін.).

Зневоднення біогазу виконують методом конденсації. Для охолодження газу використовують охолоджувачі проточного типу.

Для грубого очищення біогазу від домішок використовуються такі способи: 1) водяне очищення під тиском; 2) очищення гарячим розчином поташу; 3) очищення етаноламіном.

Для тонкого очищення газу застосовують: 1) очищення газу від CO_2 методом низькотемпературної абсорбції метанолом; 2) лужне очищення газу від CO_2 ; 3) безреагентна біокаталітична технологія очищення біогазу від сірководню H_2S .

1.3. Вимоги до систем автоматичного керування технологічними параметрами БГУ

Розвиток біогазової сфери не можливий без технічного забезпечення та автоматизації процесів БГУ. Автоматизація керування та регулювання роботи біогазової установки є важливою для ефективної та безперервної роботи об'єкта і вона повинна виконувати наступні функції [25]:

1. Моніторинг та контроль процесу: системи автоматизації повинні постійно вимірювати та контролювати різні параметри, такі як температура, тиск, рівень біогазу, склад субстратів, інші параметри, які впливають на процес утворення біогазу.

2. Регулювання подачі субстрату: автоматизовані системи керують процесом дозування субстратів для забезпечення оптимальних умови для бактеріального розкладання органічних матеріалів і виробництва біогазу.

3. Контролю за якістю газу: системи повинні моніторити склад газу, забезпечуючи видалення забруднювачів та регулювати вміст метану, який є головним компонентом біогазу.

4. Контроль системи збору та зберігання біогазу: автоматизовані системи відслідковують обсяги виробленого біогазу, регулюють тиск у резервуарах для зберігання біогазу та керують виведенням газу для використання або подальшого зберігання.

5. Безпека та аварійна ситуація: системи автоматизації повинні виявляти аварійні ситуації, такі як надмірний тиск у ферментері БГУ або витік

газу, і автоматично активувати заходи безпеки, включаючи відключення процесу.

6. Дистанційний моніторинг і керування: системи моніторингу та дистанційного керування повинні здійснювати дистанційний моніторинг та керування БГУ через Інтернет або мережі мобільного зв'язку (SCADA-система або використання технології "Інтернет речей").

7. Оптимізація енергоспоживання: автоматизація сприяє оптимізації використання енергії в процесі виробництва біогазу, зокрема, ефективному використанню тепла, що виробляється в процесі метаногенезу, для нагріву води, опалення або виробництва електроенергії.

8. Звітність і аналіз даних: системи автоматизації повинні здійснювати збирання даних про роботу установки, з метою аналізу результатів та вдосконалення процесів.

9. Ефективність та зменшення витрат: автоматизація допомагає знижувати витрати на енергію, оплату праці та інші ресурси, підвищуючи виробничу потужність та видачу біогазу при менших витратах.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ БГУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Біотехнічний процес метанового зброджування органічних відходів

Метаногенез (біологічний синтез метану) – один з найважливіших етапів процесу анаеробного розкладання органічних сполук, що відбувається без присутності кисню O_2 :



де n – кількість молекул або глюкозних залишків;

$(C_6H_{10}O_5)_n$ – органічна сировина (целюлоза);

H_2O – вода; CO_2 – вуглекислий газ; CH_4 – метан;

$[J]$ – енергія (теплота).

На рис. 2.1 зображені основні етапи анаеробного метаногенезу органічних субстратів комплексом мікроорганізмів [19].

1. *Фаза гідролізу.* Анаеробні бактерії під дією ензимів (амілаз, протеаз, ліпаз) розщеплюють високомолекулярні сполуки (білок, вуглеводи, ліпіди, целюлозу) органічних субстратів на низькомолекулярні зброджувані сполуки-метаболіти (цукор, амінокислоти, жирні кислоти, глюкозу та воду).

2. *Фаза окислення або ацидогенезу.* Період формування необхідних умов активації метанових бактерій завдяки залученню до процесу ферментації молекул кислот, утворених бактеріями. В анаеробних умовах утворюються нестійкі органічні кислоти – оцтова, мурашина, молочна, пропіонова, масляна, низькомолекулярні спирти й гази – двоокис вуглецю CO_2 , водень H_2 , сірководень H_2S і аміак NH_4 .

3. *Фаза зброджування або ацетилогенезу.* З органічних кислот здійснюється утворення оксикислот, зокрема піровиноградної кислоти. Фаза ацетилогенезу призначена для отримання вихідних продуктів створення

метану, що дає енергетичне проміжне з'єднання ацетил-КоА, двоокису вуглецю і водню.

4. *Фаза метаногенезу*. Відновлення ацетил-КоА і CO_2 з утворенням метану CH_4 , двоокису вуглецю CO_2 і води H_2O як продуктів життєдіяльності метанових бактерій.

Більшість метаногенних бактерій спроможні використовувати H_2 і CO_2 для утворення CH_4 , в той час, як лише п'ята частина описаних до цього часу видів використовує ацетат, метанол чи метиламін.

2.2. Керування температурним режимом процесу анаеробного бродіння

Процес керування температурним режимом у біореакторах полягає у вирівнюванні температурних полів по всьому об'єму реактора та підтримка оптимальної температури для обраного режиму бродіння. Це досягається за допомогою автоматизованого контролю параметрів температурних режимів, рівномірному прогріванні та активному перемішуванні субстрату.

Метаболічна активність анаеробних бактерій напряму залежить від температури зброджуваного субстрату: зі зростанням температури розкладання органіки та вихід метану збільшується. При зниженні ж температури до 15°C і менше процес бродіння зупиняється повністю [26].

Для отримання біогазу використовують різні за конструктивним виконанням БГУ. Основними показниками ефективної роботи біогазової установки є продуктивність, вихід біогазу з одиниці об'єму біомаси, тривалість робочого циклу та енергетичні затрати із забезпечення температурної стабілізації процесу та інтенсифікації конверсії біомаси. Вказані показники багато в чому визначають собівартість виробництва біогазу. Тривалість робочого циклу БГУ для забезпечення максимального виходу біогазу з одиниці об'єму біомаси визначається за умови

$$t_{p.ц.} = f(t_3, t_{n.ф.}, t_{ф.}, t_6) \rightarrow t_{\min}, \quad (2.2)$$

де t_3 – тривалість завантаження біомаси у реактор БГУ;

$t_{n.ф.}$ – тривалість підготовки сировини до активної фази ферментації;

$t_{ф.}$ – тривалість процесу активної ферментації біомаси;

t_6 – тривалість вивантаження відпрацьованого субстрату з реактора.

Більшу частину (80...90%) тривалості технологічного циклу біогазової установки займає тривалість активної ферментації біомаси. Вона визначається режимом анаеробного зброджування, кількісним та якісним складом субстрату, затратами енергії на забезпечення температурної стабілізації процесу анаеробного бродіння.

Анаеробний процес, який протікає у біореакторі, потребує певну кількість енергії: теплову – для підтримання стабільного температурного режиму в реакторі та попереднього нагріву субстрату до температури зброджування; механічну – для забезпечення перемішування сировини в ємностях та переміщення субстрату (завантаження початкової сировини та вивантаження дегістату). Експлуатація біореакторів вимагає забезпечення стабільного температурного режиму при різних умовах оточуючого середовища. Коливання температурного режиму не повинно перевищувати меж, що є сприятливими для ферментації бактерій у субстраті (див. п. 1.2.4). Тому доцільно дослідити тепломасообмінні процеси в біореакторі при різних режимах: психрофільному, мезофільному та термофільному [20].

Технологія метанового зброджування у БГУ вимагає дотримання меж температурних режимів, інтенсифікації теплообміну між системою нагріву та субстратом. Схема тепломасообмінних процесів в БГУ зображена на рис. 2.2.

V_G – об'єм газу, який отриманий у результаті анаеробного метаногенезу, м^3 ;

ρ_T – густина твердої фракції біогазової суміші, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_P – густина рідкої фракції біогазової суміші, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_G – густина субстрату, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Складові $\rho_T \frac{dV_T}{dt}$ та $\rho_P \frac{dV_P}{dt}$ характеризують зміну мас твердої та рідкої фракцій субстрату після її переробки у біореакторі.

Тепловий режим метанового зброджування залежить від теплоізоляційних властивостей зовнішніх огорожень біореактора, додаткової енергії, яка надходить у БГУ для забезпечення стабільного температурного режиму, а також від типу режиму анаеробного бродіння (психрофільний, мезофільний або термофільний), для підтримки якого має дотримуватись тепловий баланс між втратами та надходженнями теплової енергії.

Рівняння теплового балансу БГУ описується залежністю

$$Q_B = \alpha_T F_B (T_B - T_3) + m_B C_m \frac{d(T_B - T_3)}{dt} + Q_T - Q_G, \quad (2.5)$$

Q_B – кількість теплоти, що подається в об'єм біореактора, Дж;

α_T – загальний коефіцієнт теплопередачі через корпус та теплозахисні конструкції реактора, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

F_B – площа зовнішньої поверхні корпусу БГУ, м^2 ;

T_B – температура внутрішнього середовища у біореакторі, $^\circ\text{C}$;

T_3 – температура назовні біогазової установки, $^\circ\text{C}$;

$\alpha_T F_B (T_B - T_3)$ – формула, яка характеризує втрати теплоти з БГУ у навколишнє середовище;

m_B – маса біогазової суміші, повітря та субстрату в біореакторі, кг;

C_m – приведена питома масова теплоємність субстрату, біогазової суміші та повітря в біореакторі, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

$m_B C_m \frac{d(T_B - T_3)}{dt} = m_B C_m \frac{d\Delta T}{dt}$ – формула, яка характеризує зміну теплоти,

що акумулюється в середовищі БГУ;

ΔT – поточна різниця температур під час зброджування, °C;

$Q_T = Q_{T1} + Q_{T2}$ – додаткова загальна кількість теплоти, що подається в установку для стабілізації температури субстрату (де Q_{T1} та Q_{T2} – теплота, що надходить, відповідно, від основного нагрівача та від утилізаційного теплообмінника 5 (рис. 2.2)), Дж.;

Q_r – кількість теплоти біогазу, що відводиться з біореактора, Дж.

Основні способи забезпечення термостабілізації процесу отримання біогазу є: 1) рівномірний нагрів суміші за допомогою об'ємного нагрівального елементу (зокрема обігрівачами стінками біореактора (рис. 1.20)); 2) контрольоване перемішування субстрату за певним алгоритмом з метою вирівнювання температурного поля; 3) вібраційне перемішування субстрату, яке характеризується малою частотою і високою амплітудою; 4) локальний і масовий барботаж теплообмінника; 5) використання ефективної системи теплоізоляції з метою запобігання втрат теплової енергії в комплексі із описаними системами перемішування; 6) розробка і впровадження системи автоматичного контролю та керування температурними полями в біореакторі, станом теплоізоляції, а також процесом перемішування субстрату.

2.3. Визначення динамічних властивостей біореактора та передатної функції для каналу керування температурою метанового зброджування

Для розробки та дослідження математичної моделі температурного режиму в біореакторі представимо БГУ як об'єкт, який складається із 4-х ємностей, які акумулюють теплову енергію, таких як: біомаса, що підлягає метановому зброджуванню (1), теплоносій системи підігріву (2), корпус біогазового реактора (3), оточуюче середовище назовні реактора (4).

Прийmemo з метою спрощення системи диференціальних рівнянь, яка описує динаміку температурного режиму метанового зброджування, такі припущення: 1) теплоємність стінки нагрівача розподіляється порівну між

теплоносієм системи нагріву і біомасою, яка підлягає бродінню;
2) теплоємність стінки корпусу реактора відносимо до біомаси бродіння із урахуванням маси субстрату.

За умови прийнятих припущень, реактор БГУ із системою підігріву субстрату можна подати у вигляді об'єкту, який складається із 2-х ємностей, і може бути поданий такою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} Mc \cdot Cc \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Cc \cdot Gc \cdot H \frac{\partial \theta}{\partial x} = \alpha \cdot f \cdot (t - \theta) - K \cdot F \cdot (\theta - t_3) \\ Mt \cdot Ct \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} + Ct \cdot Gt \cdot H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \cdot f \cdot (t - \theta) \end{cases} \quad (2.16)$$

де θ, t, t_3 – значення температури субстрату, теплоносія і навколишнього середовища відповідно;

$Mc \cdot Cc, Mt \cdot Ct$ – теплоємність субстрату та теплоносія відповідно;

$Cc \cdot Gc, Ct \cdot Gt$ – тепловий еквівалент субстрату та теплоносія відповідно;

α, K – коефіцієнти тепловіддачі від теплоносія до субстрату та теплопередачі крізь стінку корпусу відповідно;

f, F – площа поверхні нагрівача і корпусу біореактора відповідно.

Оскільки для керування температурою теплоносія та субстрату (регульовані параметри) застосовують їх початкові вихідні значення ($t_{вих}, \theta_{вих}$), то приймаючи найменше значення зміни температури t і θ в напрямку руху, тобто $\frac{\partial \theta}{\partial x} \cong \frac{\Delta \theta}{\Delta x} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{H}$; $\frac{\partial t}{\partial x} \cong \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t_2 - t_1}{H}$, система диференціальних рівнянь (2.6)

отримає такий вигляд:

$$\begin{cases} Mc \cdot Cc \cdot \frac{d\theta_2}{d\tau} = Cc \cdot Gc \cdot (\theta_1 - \theta_2) + Kt \cdot Ft \cdot (\bar{t}_T - \bar{\theta}_C) - Kk \cdot Fk \cdot (\bar{\theta} - t_3) \\ Mt \cdot Ct \cdot \frac{dt_2}{d\tau} = Ct \cdot Gt \cdot (t_1 - t_2) - Kt \cdot Ft \cdot (\bar{t}_T - \bar{\theta}_C) \end{cases} \quad (2.7)$$

де: M_c – маса субстрату, кг;

G_c – продуктивність біореактора, кг/с;

M_t – маса теплоносія у теплообміннику, кг;

G_t – витрати теплоносія у теплообміннику, кг/с;

C_c – питома теплоємність субстрату, Дж/(кг·°C);

C_t – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·°C);

K_t – коефіцієнт теплопередачі теплообмінника, Вт/(м·°C);

K_k – корпусу біореактора, Вт/(м·°C);

F_t – площа поверхні теплообміну теплообмінника, м²;

F_k – площа поверхні корпусу біореактора, м²;

t_2 – температура теплоносія на виході біореактора, °C;

θ_2 – температура дегістату на виході біореактора, °C;

t_3 – температура зовнішнього середовища, °C;

$\bar{t}_T = 0.5 \cdot t_1 + 0.5 \cdot t_2$; $\bar{\theta}_C = 0.5 \cdot \theta_1 + 0.5 \cdot \theta_2$ – середні значення температур, °C.

Імітаційна модель нагрівання субстрату(θ) за допомогою теплоносія (t) складена за допомогою набору бібліотек для візуалізації *Simulink* програмного пакету *MatLab*. Значення коефіцієнтів імітаційної моделі розраховані за допомогою пакету математичних розрахунків *MathCad* (лістинг із початковими даними та необхідними розрахунками наведений у додатку Б1.

Структурна схема імітаційної моделі динаміки температурного режиму у блоках *Simulink*, що відповідає системі диференціальних рівнянь (2.7), зображена на рис. 2.3.

Імітаційна модель побудована за методикою [27,28]. За допомогою блоку *Constant* введені значення параметрів M_c , M_m , G_t , G_c , C_c , C_t , K_t , K_k , t_1 , θ_1 , $t_3(t_{zc})$, необхідні дані для вирішення системи рівнянь (2.7). За допомогою блоків *Sum* і *Product* сформовані праві частини диференціальних рівнянь. Для обчислення використані додаткові блоки *Gain*. Результати обчислень правих частин рівнянь спрямовані на блоки розв'язку цих рівнянь *Integrator*. Початкові значення для зазначених блоків по обчисленню приймемо такими:

- початкова температура теплоносія $t_1 = 90^\circ\text{C}$;
- початкова температура теплоносія субстрату $\theta_1 = 15^\circ\text{C}$.

Вказані задані початкові параметри можемо коригувати при виникненні необхідності.

Результати обчислень температури t_2 та θ_2 отримані за допомогою блоку віртуального осцилографу *Scope* через віртуальний *Display*. В якості сталої часу об'єкту обраний початковий час стабілізації процесу – 16 год., для уточнення результатів досліджувався більший час 22 – 23 годин (тобто у межах від $\tau = 57000$ с до $\tau = 80000$ с в параметрах моделювання *Simulation* → *Simulation Parameters* у вікні *Stoptime*). Такі самі значення часу встановлені у вкладці параметрів *General* блоку *Scope* у вікні команди *Time range*. Після зазначених дій здійснений процес моделювання за допомогою команди *Start* меню *Simulation*. Масштабування отриманих графіків здійснюється у меню *Autoscale*.

Розгінна характеристика зміни у часі температури теплоносія зображена на рис. 2.4, температури зброджуваного субстрату в біореакторі – на рис. 2.5.

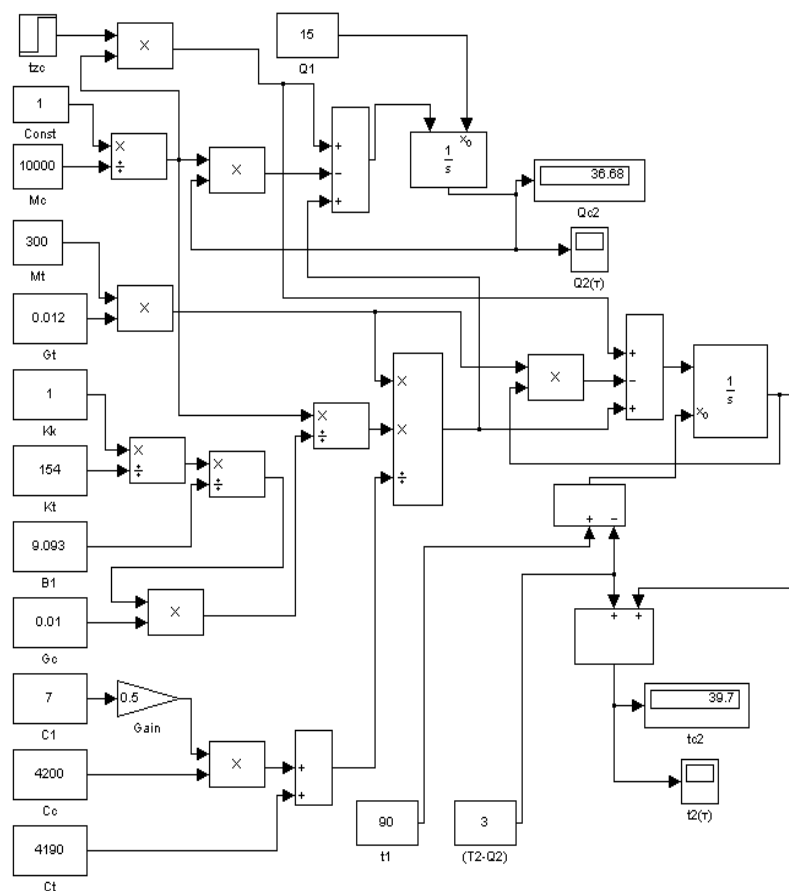


Рис. 2.3. Імітаційна модель нагрівання субстрату(θ) за допомогою теплоносія (t) в блоках бібліотеки Simulink пакету MatLab

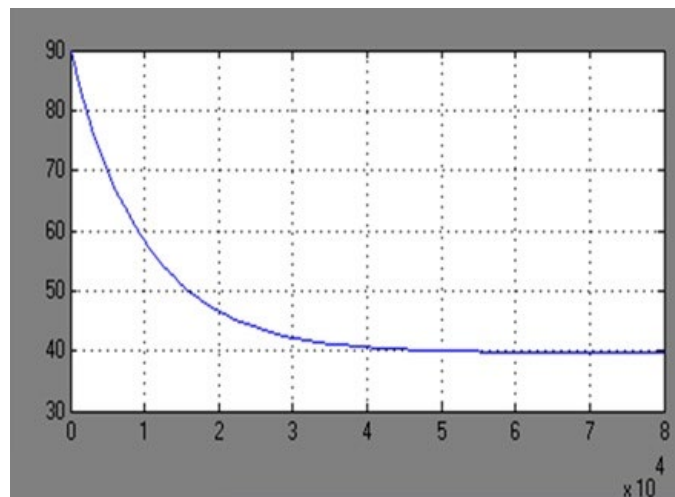


Рис. 2.4. Розгінна характеристика зміни температури теплоносія у системі нагріву субстрату в біореакторі

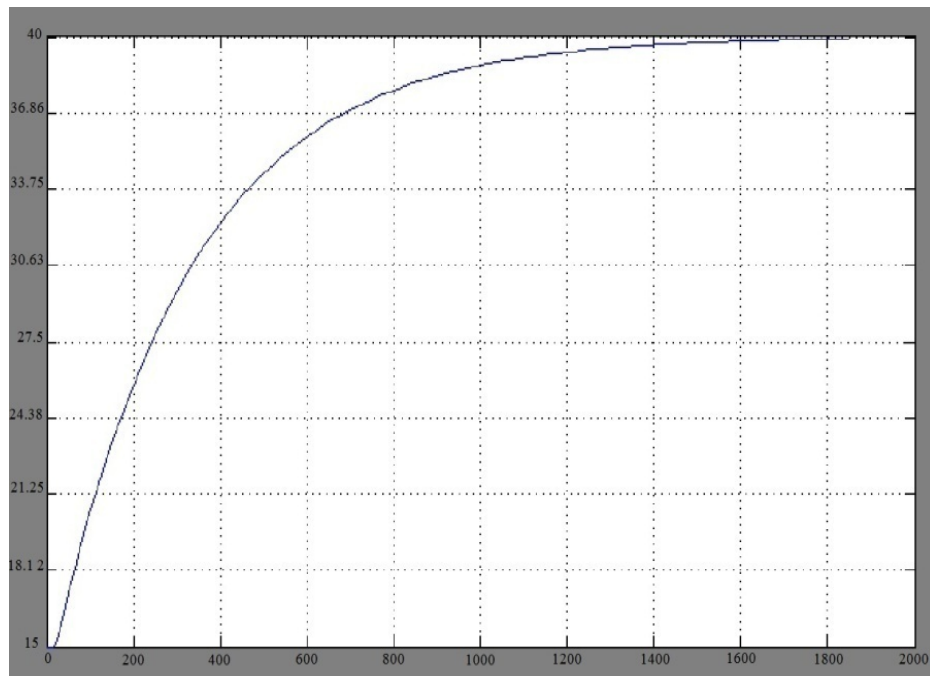


Рис. 2.5. Розгінна характеристика зміни температури субстрату в біореакторі

Для визначення динамічних характеристик біореактора як об'єкта керування температурним режимом зброджування була використана розгінна характеристика (рис. 2.5), яка представляє собою зміну температури субстрату в біореакторі при ступінчастій зміні витрати теплоносія (гарячої води) в системі нагріву. Передатна функція отримана за методикою [27] за допомогою графічного методу, для чого розгінна характеристика (рис. 2.5) була нормована (рис. 2.6) за формулою

$$y(t_i) = \frac{y(t_i) - y(t_0)}{y(\infty) - y(t_0)} = \frac{y(t_i) - 15}{40 - 15} \quad (2.8)$$

Для статичних об'єктів передатна функція, отримана за нормованою розгінною характеристикою, описується інерційною ланкою із запізненням

$$W(s) = \frac{k_{oy} \cdot e^{-\tau_{oy} \cdot s}}{T_{oy} \cdot s + 1}, \quad (2.9)$$

де k_{oy} – коефіцієнт передачі об'єкта;

T_{oy} – показник інерційності (постійна часу об'єкта), с;

τ_{oy} – показник транспортного запізнення об'єкта, с.

Чисельні значення постійної часу T_{oy} та часу запізнення τ_{oy} об'єкта визначені за допомогою дотичної, що проведена до точки перегину розгінної характеристики, яка відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається найбільший приріст ординати розгінної кривої.

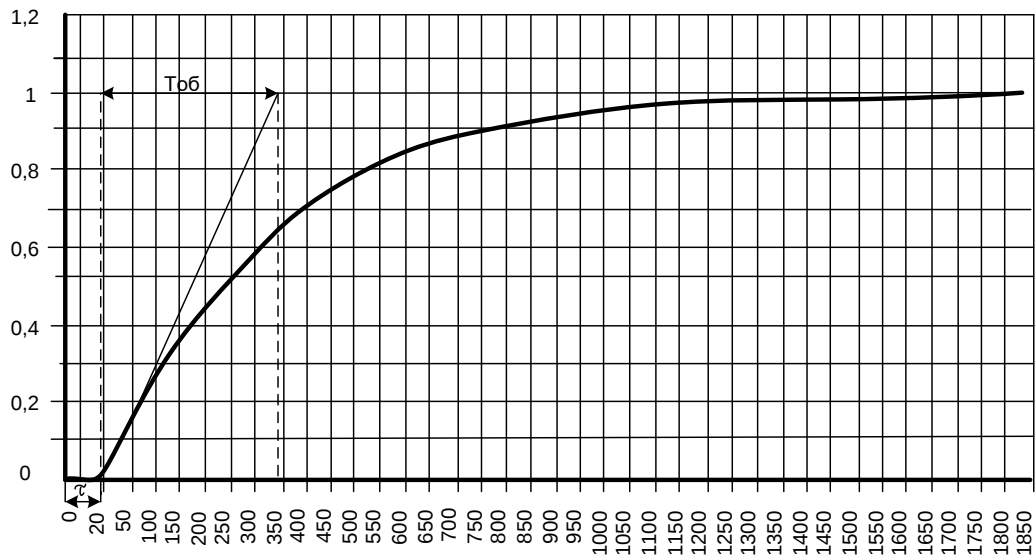


Рис. 2.6. Нормована розгінна характеристика біореактора для каналу керування температурою субстрату

Коефіцієнт передачі об'єкта керування обчислюємо за формулою

$$k_{oy} = \frac{T_K - T_{II}}{L_K - L_{II}}, \quad (2.10)$$

де T_K та T_{II} – відповідно кінцева та початкова температура субстрату в біореакторі при математичному моделюванні, °С;

L_K та L_{II} – відповідно кінцеве та початкове відносне значення витрат теплоносія системи нагріву субстрату, %.

$$T_K = 40^{\circ}\text{C}, T_{II} = 15^{\circ}\text{C}; \quad L_K = 100\%, L_{II} = 0\%.$$

$$k_{oy} = \frac{40 - 15}{100 - 0} = \frac{25}{100} = 0,25 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{ продуктивн.}} \right] \quad T_{oy} = 320 \text{ c}, \quad \tau_{oy} = 20 \text{ c}.$$

Отже, передатна функція біореактора для каналу керування

$$W_{oy}(s) = \frac{0,25 \cdot e^{-20 \cdot s}}{320 \cdot s + 1}.$$

РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

3.1. Функціональна схема автоматизації системи керування процесом виробництва біогазу

Функціональна схема автоматизації системи керування процесом виробництва біогазу зображена на аркуші 1 графічної частини роботи.

Для отримання інформації про процес виробництва біогазу використовуються:

- датчики температури теплоносія в трубній системі підігріву субстрату TE (1-1) та температури зброджуваного субстрату TE (1-2);
- датчики рівня субстрату у біореакторі: нижнього LE (1-3) та верхнього LE (1-4) рівня;
- датчик тиску PE (1-5) відображає продуктивність процесу виробництва біогазу.

Програмований логічний контролер UIRC (1-6) в залежності від отриманої від датчиків інформації формує керуючі сигнали виконавчими механізмами:

- при достатньо завантаженому біореакторі установки для рівномірного розподілу температури в об'ємі субстрату працює електродвигун приводу мішалки (запускається електромагнітним пускатчем NS (1-10);
- кількість теплоти, що передається від трубної системи підігріву до субстрату, змінюється за допомогою трьохходового клапану за рахунок зміни витрати теплоносія у системі (див. п. 3.4, рис. 3.6).

3.2. Визначення алгоритму керування температурним режимом в БГУ та вибір промислового регулятора

Використовуючи дані про об'єкт автоматизації – статичні і динамічні характеристики, відомості про збурення, технологічні вимоги до якості регулювання, – можна у кожному конкретному випадку на основі вироблених практикою критеріїв визначити алгоритм керування і вибрати тип регулятора. Вибір цей є попереднім, а кінцевий висновок про стійкість системи об'єкт – регулятор і точність регулювання роблять на основі подальших розрахунків.

При виборі типу регулятора рекомендується [29] орієнтуватися на величину відношення запізнення до постійної часу об'єкта $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$.

- Якщо $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} < 0,2$, перевагу віддають позиційному (релейному) алгоритму керування, але можливе використання і неперервного алгоритму. Рішення приймається в залежності від технологічних вимог до процесу управління.

- Якщо $0,2 < \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} < 1,0$, перевагу віддають неперервному або цифровому алгоритму керування (П-, ПІ- або ПІД алгоритм)

- Якщо $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} > 1,0$, вибирають спеціальний цифровий регулятор з екстраполятором, який компенсує запізнювання в контурі керування.

Отже, $(\tau_{oy} / T_{oy}) = 20/320 = 0,0625$.

За вказаними умовами рекомендованим є позиційний алгоритм керування, але за технологічними вимогами виробництва біогазу (див. п. 1.2), коли необхідно виключити з виробничого процесу температурні коливання субстрату, які можуть виникнути при позиційному регулюванні, необхідно використати неперервний алгоритм керування.

Відомо, що перехідний процес в САК характеризується часом регулювання t_p , перерегулюванням σ , максимальним динамічним відхиленням y_1 та статичною похибкою. При використанні різноманітних законів регулювання для одного і того ж об'єкту не вдається добитися одночасної мінімізації відомих показників.

В цьому випадку САК прийнято настроювати одним із трьох типових перехідних процесів.

Методика вибору найкращого закону регулювання для певного об'єкта полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання.

Для статичних об'єктів:

$$R_d = \frac{y_1}{k_{об} \cdot y_3}, \quad (3.1)$$

де $k_{об}$ – коефіцієнт передачі об'єкту управління;

y_3 – максимально допустиме збурення по навантаженню, в % ходу РО;

y_1 – максимальне динамічне відхилення.

Підставивши відповідні значення, отримали:

$$R_d = 2 / (0,25 \cdot 40) = 0,25.$$

За графічними залежностями [29], визначаємо закон керування – це ПІ-закон керування з типовим перехідним процесом з 20%-ним перерегулюванням.

Для технічної реалізації системи автоматичного керування температурним режимом у біореакторі БГУ вибираємо програмований логічний контролер AQteck ПЛК160 (рис. 3.2).

AQteck ПЛК160 – лінійка програмованих лінійних моноблокових контролерів із дискретними та аналоговими входами/виходами на борту для автоматизації систем середнього рівня та розподілених систем керування.



Рис. 3.2. Программований логічний контролер AQteck ПЛК160

Рекомендується для використання у системах керування кліматичним обладнанням, у системах HVAC, у сфері ЖКГ (ІТП, ЦТП), в АСК водоканалів (водопідготовка, насосні станції), для керування харчопереробними та пакувальними апаратами, а також у сфері виробництва будівельних матеріалів.

Відмінними особливостями лінійки контролерів AQteck ПЛК160 є:

- потужні обчислювальні ресурси та великий об'єм пам'яті;
- наявність дискретних та аналогових входів/виходів на борту контролера;
- наявність послідовних портів (RS-232, RS 485) на борту контролера;
- наявність порту Ethernet для увімкнення у локальні або глобальні мережі верхнього рівня;
- підтримання протоколів обміну Modbus (RTU, ASCII), OVEN, DCON;
- можливість роботи безпосередньо з портами контролера, що дозволяє приєднувати зовнішні пристрої з нестандартними протоколами.

Крім того, контролер має вбудований годинник, що дозволяє створювати системи керування з урахуванням реального часу, а також вбудований акумулятор, який дозволяє організувати низку додаткових сервісних функцій (можливість короткочасного перечікування зникнення живлення, переведення вихідних елементів у безпечний стан).

Технічні характеристики програмно-логічного контролера AQteck ПЛК160 наведені на сайті виробника [30].

3.3. Вибір первинного вимірювального перетворювача

Вимірювальні перетворювачі, що входять до складу регулятора, вибирають найчастіше в два етапи:

- на першому етапі за типом контрольованого параметра об'єкта управління та умовами його роботи визначають різновид перетворювача;
- на другому етапі, після вибору всіх елементів регулятора, за довідниками знаходять його типорозмір.

При обґрунтуванні вибору датчика температури для регулятора температури в біореакторі БГУ необхідно в першу чергу звернути увагу на те, який діапазон зміни температури відповідно до технічних умов повинна забезпечити проектована система керування.

Для того, щоб перетворювач в процесі стабілізації температури при виробництві біогазу до заданого рівня не вносив неприпустиму динамічну похибку вимірювання, його постійна часу T_{CE} повинна бути на порядок меншою від постійної часу об'єкта управління T_{OY} .

Передатна функція біогазової установки

$$W_{OY}(s) = \frac{0,25 \cdot e^{-20s}}{320 \cdot s + 1}.$$

Постійна часу об'єкта управління T_{OY} при цьому складає 320 с.

Як було зазначено, діапазон вимірювання температури субстрату бродіння у біореакторі для термофільного режиму за технологічними нормами складає $T = 45...55^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{опт}} = 48...51^{\circ}\text{C}$.

Враховуючи зазначені вище умови, використаємо датчик температури – термометр опору ТСМУ-2212-50М (ТУ 50-98 ДДШ0.282.007ТУ) (рис. 3.3), технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Характеристика термометра опору ТСМУ-2212

Тип	Номинальна статична характеристика	Діапазон вимірювання, $^{\circ}\text{C}$	Показник теплової інерції
ТСМУ-2212	50М	-50...+150	15 с

Матеріал захисної арматури – сталь 12Х18Н10Т.

Матеріал корпусу – фенопласт ВХ5-010-73.

Габаритні розміри – 48х40х200 мм.

Середнє напруцювання на відмову – 200000 годин.



Рис. 3.3. Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом ТСМУ-2212

Термоперетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом типу ТСМУ призначені для неперервного перетворювання температури середовища (газів, пари, рідин та сипких середовищ) у пропорційний струмовий сигнал 0-5 або 4-20 мА дистанційної передачі. Датчик складається із вбудованого в головку вимірювального перетворювача із вихідним сигналом 0-5 або 4-20

мА та термозонду. Вимірюваний параметр – температура – лінійно перетворюється термочутливим елементом у пропорційну зміну омичного опору, який, в свою чергу, перетворюється вимірювальним перетворювачем у струмовий вихідний сигнал.

Отже, $15/230 = 0,065 < (0,2...0,3)$, тому за швидкодією датчик підходить для даного об'єкта.

Передатна функція термометра опору є інерційною ланкою

$$W_{CE}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1}.$$

Передатний коефіцієнт k_{CE} визначається за виразом $k_{CE} = \frac{dR_t}{d\theta}$.

Оскільки $R_t = R_o \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$, то $k_{CE} = \frac{dR_t}{d\theta} = R_o \cdot \alpha$, де R_o – номінальний опір датчика температури при 0°C . Оскільки цей вимірювальний перетворювач має номінальну статичну характеристику 50М (рис. 3.4), то для нього $R_o = 50 \text{ Ом}$; α – температурний коефіцієнт опору.

Для мідних термометрів опору він становить $4,26 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}/^\circ\text{C}$.

Тоді $k_{CE} = 50 \cdot 4,26 \cdot 10^{-3} = 0,213 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$, і передатна функція сприймаючого елемента $W_{CE}(s) = \frac{0,213}{15 \cdot s + 1}$.

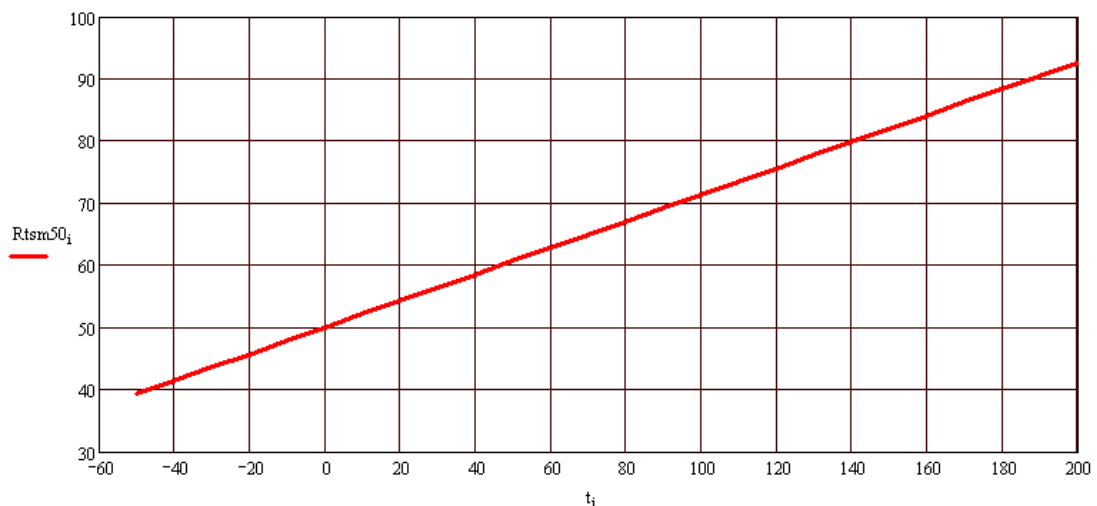


Рис. 3.4. Статична характеристика мідного термоопору із HCX 50M
(значення опору при $t = 0^\circ\text{C}$ дорівнює $R_o = 50 \text{ Ом}$)

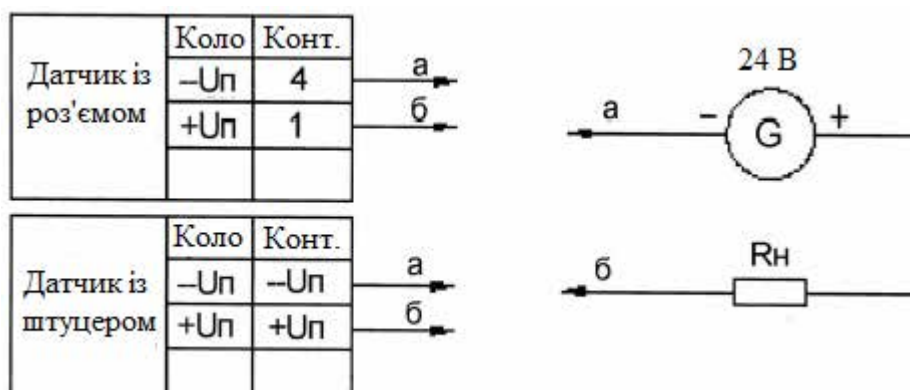


Рис. 3.5. Схема зовнішніх з'єднань датчиків типу ТСМУ із вихідним сигналом 4-20 мА

3.4. Вибір регулюючого органу та визначення його передатної функції

Змішувальний вузол (рис. 3.6), до складу якого входять виконавчий механізм і регулюючий орган, призначений для регулювання витрати теплоносія в системі нагріву субстрату БГУ.

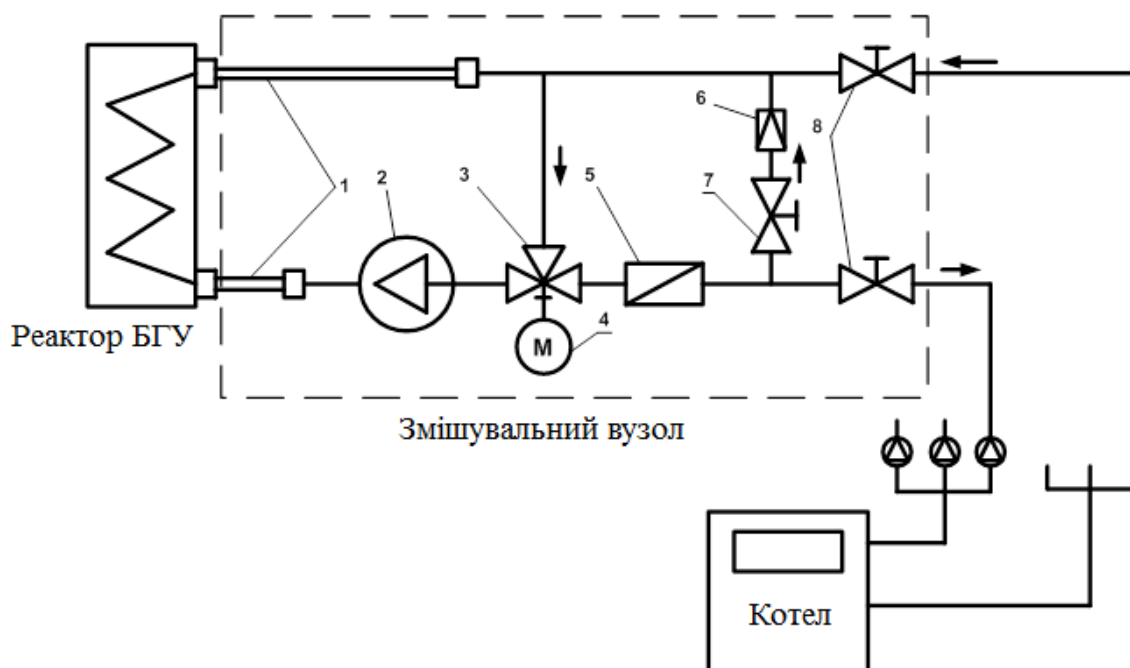


Рис. 3.6. Функціональна схема регулювання витрати теплоносія в системі нагріву субстрату БГУ

На рис. 3.6 прийняті наступні позначення: 1 – приєднувальні труби; 2 – циркуляційний насос; 3 – трьохходовий регулюючий клапан (регулюючий орган САК); 4 – сервопривод, що керує трьохходовим клапаном (виконавчий механізм САК); 5 – фільтр; 6 – балансувальний вентиль для встановлення опору байпаса; 7 – зворотний клапан; 8 – сервісні запірні вентилі.

Вихідними даними для вибору регулюючого органу (РО) є:

$\gamma = 1 \text{ г/см}^3$ – об’ємна маса води;

$\nu = 0,2$ – в’язкість води;

$Q_{\max} = 100 \text{ м}^3/\text{год.}$, $Q_{\min} = 20 \text{ м}^3/\text{год.}$ – максимальна та мінімальна об’ємна витрати гарячої води, призначеної для нагріву субстрату в біореакторі;

$P_1 = 15 \text{ кг/см}^2$ – абсолютний тиск в системі постачання гарячої води до РО;

$\Delta P_c = 10 \text{ кг/см}^2$ – перепад тиску в системі;

$\Delta P_{\text{Л max}} = 4 \text{ кг/см}^2$ – максимальний перепад тиску в лінії.

Під час вибору регулюючих органів є певна послідовність розрахунків:

1. Обчислюють максимальну пропускну здатність регулюючого органу та його умовний діаметр.
2. Визначають робочий відрізок витратної характеристики.
3. Знаходять теоретичну витратну характеристику (для клапанів).
4. Визначають для рідини робочу ділянку кривої зміни перепаду тиску (для газу та пари знаходять максимальний та мінімальний перепади тиску).

Обчислюємо максимальну пропускну здатність РО:

$$K_{\gamma \max} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{\min}}} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_c - \Delta P_{\text{Л max}}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{10 - 4}} = 41 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (3.2)$$

Регулювальний орган вибирають за умови, що

$$K_{\gamma} \succ 1,2 \cdot K_{\gamma \max}. \quad (3.3)$$

Тоді $K_{\gamma} \geq 1,2 \cdot K_{\gamma \max} = 1,2 \cdot 41 = 49,2 \text{ м}^3/\text{год.}$

Для контуру керування температурним режимом БГУ згідно функціональної схемою автоматизації використовується трьохходовий регулюючий клапан.

За довідниковими даними [31] вибираємо *трьохходовий регулювальний клапан* (рис. 3.7) з умовним діаметром $D_y = 50\text{мм}$ і пропускною здатністю K_v $p_o = 50\text{ м}^3/\text{год}$.

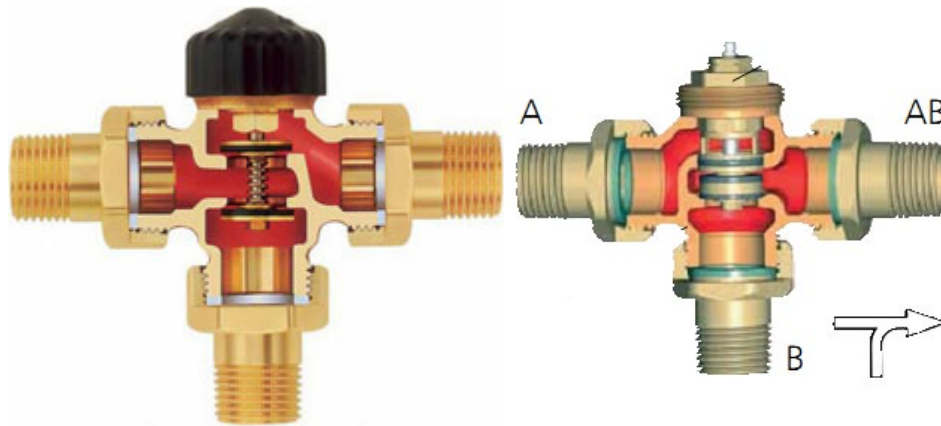


Рис. 3.7. Зовнішній вигляд трьохходового клапану

У трубопроводах трьохходовий клапан встановлюється таким чином, що він не здійснює зміну потоку води – її тиск завжди залишається постійним, змінюється лише співвідношення проходження гарячої та відпрацьованої води. Трьохходовий клапан має досить просту конструкцію: він являє собою корпус, що має два вхідних і один вихідний отвір.

В якості регулюючого елемента в клапані, зазвичай, застосовується або шток спеціальної конструкції, який може рухатися у вертикальному напрямку, або куля, яка може повертатися навколо осі. При цьому регулюючий елемент не здійснює повне перекриття клапана, а перерозподіляє потоки рідин, тим самим виробляючи їх змішування.

Поправки на в'язкість не вводимо, оскільки індекс в'язкості:

$$z = 420 \cdot \frac{Q_{\max}}{\nu \cdot \sqrt{K_{v\max}}} = 420 \cdot \frac{100}{0,2 \cdot \sqrt{41}} = 32813 > 1000. \quad (3.4)$$

Формули для розрахунку пропускної здатності [31]

Вид гідравлічного опору	Перепад тиску	Витрата		
		рідини Q, м ³ /год.	газу G, кг/год.	пари G, кг/год.
ВП	$\Delta P < P_1/2$	$K_\gamma = Q \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P}}$	$K_\gamma = \frac{G}{514} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\Delta P \cdot P_2 \cdot \gamma_n}}$	$K_\gamma = \frac{G}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{V_2}{\Delta P}}$
	$\Delta P \geq P_1/2$		$K_\gamma = \frac{G}{257 \cdot P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\gamma_n}}$	$K_\gamma = \frac{G}{22,4} \cdot \sqrt{\frac{V}{\Delta P}}$
Лінія	$\Delta P_{\text{л}} < P_2/2$	$K_{\gamma\text{л}} = Q \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{\text{л}}}}$	$K_{\gamma\text{л}} = \frac{G}{514} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{\Delta P_{\text{л}} \cdot P_3 \cdot \gamma_n}}$	$K_{\gamma\text{л}} = \frac{G}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{V_3}{\Delta P_{\text{л}}}}$
	$\Delta P_{\text{л}} \geq P_2/2$		$K_{\gamma\text{л}} = \frac{G}{257 \cdot P_2} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{\gamma_n}}$	$K_{\gamma\text{л}} = \frac{G}{2,4} \cdot \sqrt{\frac{V_1}{P_2}}$

Знаходимо робочу ділянку витратної характеристики вибраного регулюючого органу. Для цього скористуємось виразом з таблиці 3.2:

$$K_{\gamma\text{л}} = Q_{\text{max}} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{\text{л max}}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} = 50 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (3.5)$$

Визначаємо відношення перепаду тиску на РО при максимальній витраті до перепаду тиску в лінії:

$$n = \frac{K_{\gamma\text{ро}}}{K_{\gamma\text{л}}} = \frac{50}{50} = 1. \quad (3.6)$$

Уточнюємо перепад тиску на виконавчому пристрої:

$$\Delta P_{\text{вп}} = \frac{\Delta P_{\text{с}}}{1+n^2} = \frac{10}{1+1^2} = 5 \text{ кгс/см}^2. \quad (3.7)$$

Визначаємо витрату рідини через виконавчий пристрій в разі перепаду тиску на ньому:

$$Q_{\text{вп}} = K_{\gamma\text{ро}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{вп}}}{\gamma}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{5}{1}} = 112 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (3.8)$$

Знаходимо відносну максимальну та мінімальну витрату рідини:

$$\mu_{\max} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{ВП}}} = \frac{100}{112} = 0,89; \quad \mu_{\min} = \frac{Q_{\min}}{Q_{\text{ВП}}} = \frac{20}{158} = 0,18. \quad (3.9)$$

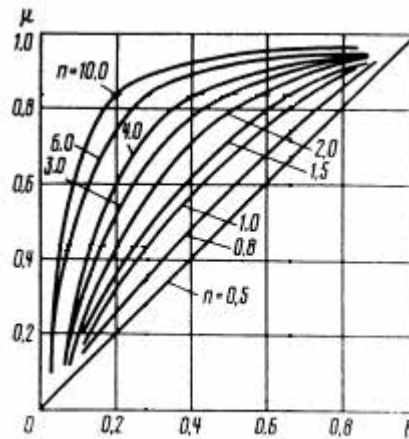


Рис. 3.8. Робочі витратні характеристики для регулювальних клапанів

За графіком (рис. 3.8) вибираємо витратну характеристику ВМ, згідно якої відносний хід затвора регулювального органа (плунжера):

$$l_{\min}=0,12; \quad l_{\max}=0,8.$$

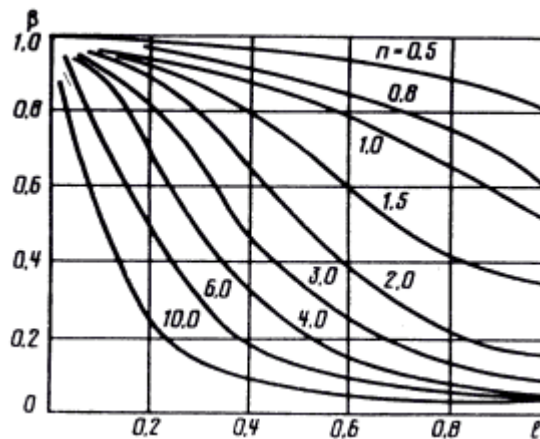


Рис. 3.9. Зміни перепадів тисків на ВМ для регулювальних клапанів

При цьому відношення перепаду тиску на РО до перепаду тиску в системі змінюється від $\beta_{\max}=0,95$ до $\beta_{\min}=0,68$ (рис. 3.9), що відповідає наступним перепадам:

$$\beta_{\max} = \frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_c}; \beta_{\min} = \frac{\Delta P_{\min}}{\Delta P_c}. \quad (3.10)$$

Потім розраховуємо значення:

$$\Delta P_{\max} = \beta_{\max} \cdot \Delta P_c = 0,95 \cdot 10 = 9,5 \text{ кг/см}^2; \quad (3.11)$$

$$\Delta P_{\min} = \beta_{\min} \cdot \Delta P_c = 0,68 \cdot 10 = 6,8 \text{ кг/см}^2. \quad (3.12)$$

Таким чином, після розрахунку необхідного регулюючого органу, отримуємо дані для вибору виконавчого механізму.

3.5. Вибір виконавчого механізму САК температурним режимом БГУ

Виконавчим механізмом (ВМ) називається пристрій автоматики, який діє безпосередньо або через погоджуючі елементи на регулюючий орган об'єкта управління. ВМ, як частина системи автоматичного управління, призначений для відпрацювання управляючого сигналу, який формується управляючими елементами автоматики таким чином, щоб відхилення регулюючої величини від заданого значення становило якнайменше значення. Виконавчі механізми, які з'єднані безпосередньо з регулюючими органами, переміщують їх відповідно до сигналу, що надходить від пристрою, який формує закон регулювання.

До ВМ пред'являють ряд вимог:

- здатність розвивати необхідне переставне зусилля або момент, достатні для перестановки регулюючого органу об'єкта,
- забезпечити перестановку регулюючого органу на потрібну величину,
- забезпечити потрібну швидкість і прискорення переміщення регулюючого органу,
- мати високі техніко-економічні показники (надійність, ціна та ін.).

ВМ обираються залежно від величини обертального моменту необхідного для переміщення регулюючого органу [31]:

$$M_z = k \cdot (M_p + M_m), \quad (3.13)$$

де M_p – реактивний момент:

$$M_p = 0.07 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^3 = 0.07 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^3 \approx 0.83 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_m = 0.785 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^2 \cdot r_m \cdot \lambda = 0.785 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0.15 \approx 0.28 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_z = 2 \cdot (0.83 + 0.28) = 2.22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент обертання валу обраного виконавчого механізму повинен бути більшим за момент, необхідний для обертання заслінки: $M_n > M_z$.

В якості електроприводу, яким комплектується трьохходовий клапан, виступає сервопривод, побудований на електродвигуні невеликої потужності і системі передач.

Для приводу клапана обраний сервопривод BELIMO LM230ASR-TP (рис. 3.10), що за технічними характеристиками задовольняє наведеним вище умовам.

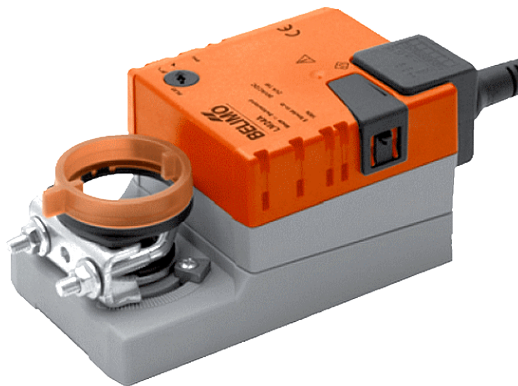


Рис. 3.10. Виконавчий механізм BELIMO LM230ASR-TP

Передатна функція виконавчого механізму (сервоприводу) є інтегруючою ланкою

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{s}, \quad (3.14)$$

де k_{BM} - коефіцієнт передачі виконавчого механізму, град./с.

Технічні характеристики сервоприводу BELIMO LM230ASR-TP

Тип	Максимальний момент навантаження, Н·м	Час повного ходу, сек/90°	Температура навколишнього середовища, °C	Ступінь захисту	Маса, кг
LM230	10	58	0...+60	IP65	3,5

Напруга живлення 220 В, 50 Гц.

Механічне приєднання – фланцеве згідно з ISO 5211.

$$k_{BM} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (3.15)$$

Δt - проміжок часу, с;

$\Delta\varphi_{OB}$ - кут повороту вихідного валу за проміжок часу Δt , град.

$$k_{BM} = \frac{90}{58} = 1,56 \frac{\text{град}}{\text{сек}}.$$

$$W_{BM}(s) = \frac{1,56}{s}.$$

Оскільки за конструктивним виконанням у сервоприводі реалізований зворотний зв'язок за положенням (реостатний датчик положення), то остаточна передатна функція виконавчого механізму визначається як

$$W_{BM}(s) = \frac{W_{CEEP}(s)}{1 + W_{CEEP}(s)} = \frac{\frac{1,56}{s}}{1 + \frac{1,56}{s}} = \frac{1,56}{s + 1,56} = \frac{1}{\frac{1}{1,56} \cdot s + 1} = \frac{1}{0,64 \cdot s + 1}.$$

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Цифрові системи керування – це системи, в яких безперервні сигнали перетворюються в цифрові коди і керування здійснюється з використанням алгоритмів обробки цифрової інформації.

Цифрові системи керування передбачають перетворення безперервних сигналів у цифрові коди та зворотне перетворення цифрових кодів у безперервні сигнали. Такі перетворення здійснюють аналогово-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі. У таких перетворювачах здійснюється квантування як за часом так і за рівнем.

4.1. Визначення часу квантування сигналів ЦСК

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями.

Види дискретизації: 1) за часом; 2) за рівнем; 3) одночасна дискретизація за рівнем і за часом

Задача вибору раціонального часу квантування T_k є однією з основних проблем реалізації ЦСК. При зменшенні часу керування точність керування цифровою системою збільшується, але при цьому зростає навантаження мікроЕОМ масивами інформації. При збільшенні часу квантування втрачається важлива інформація про сигнал, що може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування T_k , який задовольнив би такі суперечливі вимоги.

Згідно з теоремою Котельникова, для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати $2\omega_c$, де ω_c – найвища частота вихідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж ω_c рад/с, він повністю описується своїми значеннями, виміряними у дискретні моменти часу за інтервалом $T_k = \pi / \omega_c$.

У подальших розрахунках нехтуємо передатною функцією виконавчого механізму (сервоприводу) внаслідок дуже малої постійної часу (0,64 с).

Визначення передатної функції неперервної частини розімкнутої системи

$$W_{PO3}^{Hq}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} \cdot \frac{k_{OY}}{T_{OY} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s} = \frac{k_{CE} \cdot k_{OY} \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_{CE} \cdot T_{OY} \cdot s^2 + (T_{CE} + T_{OY}) \cdot s + 1} \quad (4.1)$$

$$W_{PO3}^{Hq}(s) = \frac{0,04 \cdot e^{-20 \cdot s}}{4800 \cdot s^2 + 335 \cdot s + 1}.$$

Передатна функція замкненої неперервної частини

$$W_{3AM}^{Hq}(s) = \frac{W_{PO3}^{Hq}(s)}{1 + W_{PO3}^{Hq}(s)}. \quad (4.2)$$

$$W_{PO3}^{Hq}(s) = \frac{0,04 \cdot e^{-20 \cdot s}}{(4800 \cdot s^2 + 335 \cdot s + 1) + 0,04 \cdot e^{-20 \cdot s}}.$$

У результаті розв'язання рівняння

$$A(\omega) = \frac{k_{CE} \cdot k_{OY}}{\sqrt{(-T_{CE} \cdot T_{OY} \cdot \omega^2 + 1 + k_{CE} k_{OY})^2 + (T_{CE} \cdot T_{OY})^2 \cdot \omega^2}} = 0,01. \quad (4.3)$$

Скориставшись математичним пакетом Mathcad, отримаємо значення частоти (рис. 4.1) та періоду квантування.

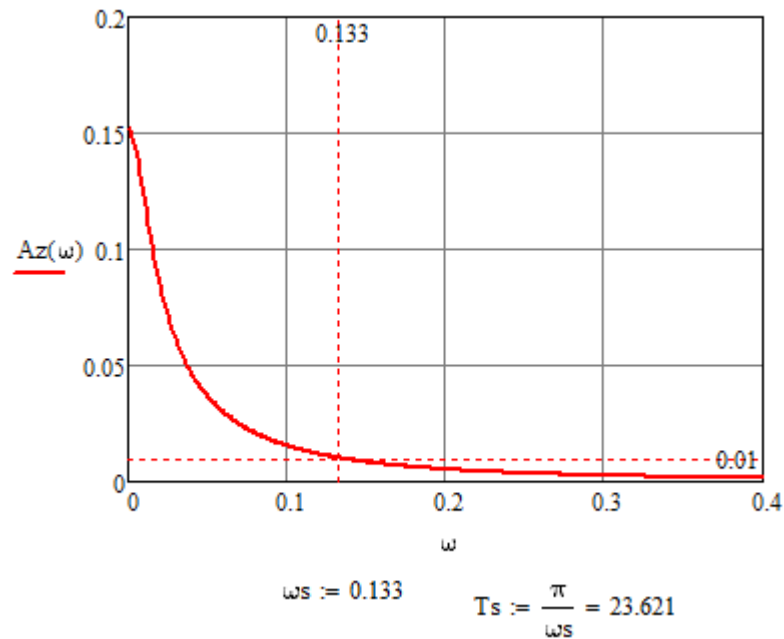


Рис. 4.1. Визначення періоду квантування ЦСК у пакеті Mathcad

$$\omega_c = 0,133.$$

Час квантування

$$T_K = \frac{\pi}{\omega_C} = 23,6 \text{ с} . \quad (4.4)$$

4.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування

Аналогічно з неперервними системами, в цифрових системах можна реалізувати ПІ-алгоритм керування (рис 4.2).

Синтез ПІ-регулятора полягає у знаходженні параметрів K_p, K_i .

Параметр інтегральної складової регулятора, який залежить від добротності за швидкістю K_v неперервної частини, визначається за виразом

$$K_i = \frac{K_v}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{н.ч.}(z)} \quad (4.5)$$

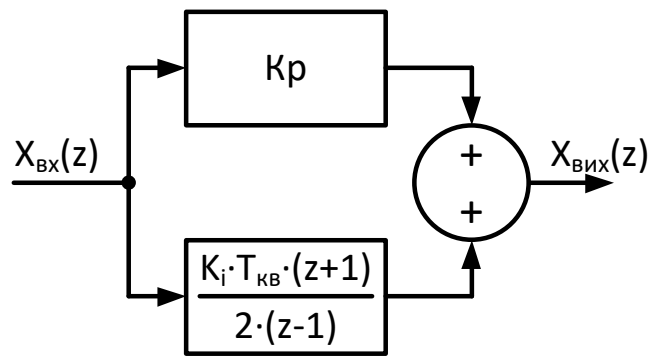


Рис. 4.2. Структурно-алгоритмічна схема цифрового ПІ-регулятора:

K_p , K_i – параметри відповідно пропорційної та інтегральної складових ПІ-регулятора, $T_{кв}$ – час квантування

Добротність за швидкістю визначається залежно від постійної часу об'єкта (табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Визначення добротної за швидкістю

T_o, c	K_v
~ 1	$3 \dots 10$
~ 10	$0,3 \dots 1$
~ 100	$0,01 \dots 0,04$
~ 1000	$0,004 \dots 0,012$

Згідно з таблицею $K_v = 0,025$, оскільки $T_{oy} = 320$ с.

Для визначення передатної функції $W_{н.ч.}(z)$ застосовуємо пакет імітаційного моделювання MATLAB, використовуючи операції завдання передатної функції неперервної системи $w = tf([K_o], [T_v \cdot T_o \quad T_v + T_o \quad 1])$ та Z-перетворення неперервної передаточної функції на дискретну $wz = c2d(w, T_k)$, де w – змінна, що отримала вираз неперервної передатної функції, T_k – період квантування.

При синтезі ПІ-регулятора пам'ятаємо, що ПІ-регулятор компенсує лише один полюс Z-перетворення неперервної частини:

Тоді

$$K_i := \frac{0.025}{\left(\frac{0.0002933 \cdot 1^2 + 0.03046 \cdot 1 + 0.008044}{1^3 - 0.8239 \cdot 1^2 + 0.04038 \cdot 1} \right)} = 0.179$$

Після знаходження K_i параметр K_p визначаємо таким чином, щоб компенсувати полюс Z -перетворення неперервної частини системи.

Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$\begin{aligned} W_{\text{ПІ}}(z) &= \frac{K_i \times T}{2} \frac{z+1}{z-1} = \frac{2 \times K_p \times z - 2 \times K_p + K_i \times T \times z + K_i \times T}{2z - 2} = \\ &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T)z + (K_i \times T - 2 \times K_p)}{2(z-1)} = \\ &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T) \left[z + \frac{K_i \times T - 2 \times K_p}{2 \times K_p + K_i \times T} \right]}{2(z-1)} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий K_p , який би задовольняв рівняння:

$$K_p := 1$$

Given

$$\frac{K_i \cdot T_s - 2 \cdot K_p}{K_i \cdot T_s + 2 \cdot K_p} = -0.7716$$

$$\text{Find}(K_p) = 16.357$$

Лістинг 3.1. Знаходження параметра K_p цифрового ПІ-регулятора у пакеті Mathcad

Для дослідження показників якості роботи цифрової системи використана модель у пакеті імітаційного моделювання MATLAB/Simulink (рис. 4.3) та отримаємо перехідний процес цифрової системи з ПІ-регулятором (рис. 4.4).

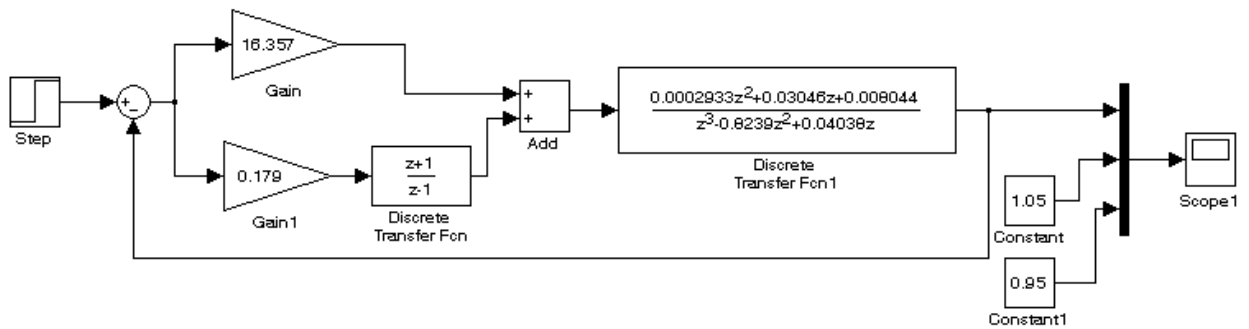


Рис. 4.3. Структурно-алгоритмічна схема цифрової системи керування температурним режимом у БГУ у пакеті MATLAB/Simulink

За характером перехідного процесу видно, що система є стійкою із наступними показниками якості роботи:

Час регулювання $t_p = 180$ с; перерегулювання $\sigma = 22\%$; коливальність $n=1$; відсутня статична похибка. Ці показники задовольняють технологічні вимоги процесу виробництва біогазу у БГУ.

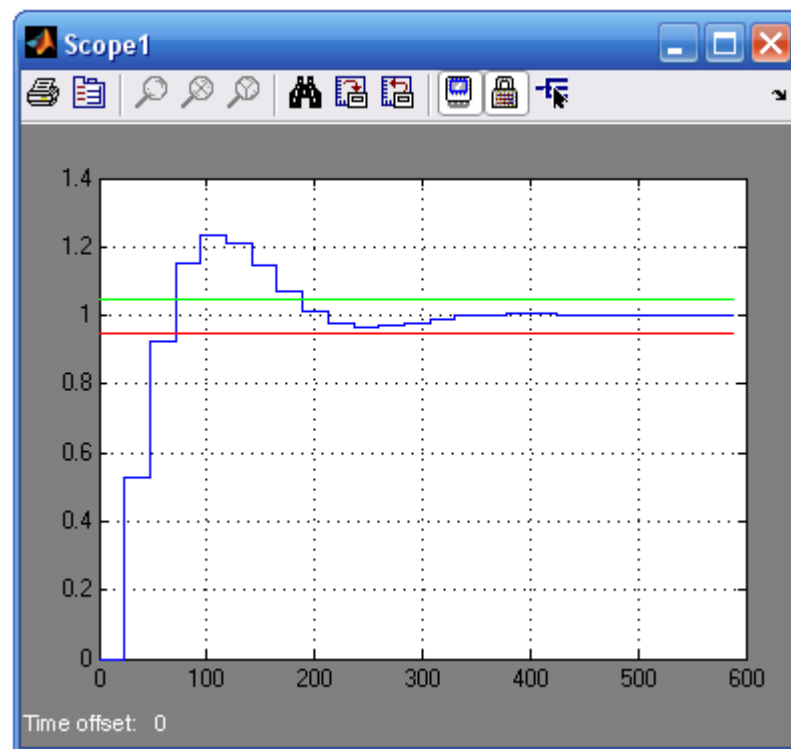


Рис. 4.4. Перехідний процес цифрової САК температурним режимом у біореакторі БГУ

РОЗДІЛ 5

СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1. Розробка схеми електричної принципової системи керування температурним режимом у біогазовій установці

Фрагмент схеми електричної принципової системи керування температурним режимом у біореакторі БГУ наведена на рис. 5.1 та на листі №2 графічної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи. Вона передбачає два режими роботи – ручний і автоматичний. Перемикання між режимами роботи здійснюється за допомогою трипозиційного перемикача SA1 (у положенні "0" система знаходиться у вимкненому стані; положення "А" відповідає переведення режиму роботи в автоматичний, "Р" – у ручний режим роботи).

У ручному режимі роботи керування виконавчими механізмами здійснюється за допомогою кнопових постів SB1-SB6, які оснащені додатковими допоміжними контактами. Кнопкою SB2 "Пуск" подається напруга, що замикає контакт 4 магнітного пускача KM1.2, який також підключений до кнопки SB3 "стоп". Це дозволяє ввімкнути двигун. Напруга від кнопки SB3 поступає до контакту 5 датчика кутового положення клапана SQ1, а потім подається на контакт 6 магнітного пускача KM1.3. Напруга через контакт 7 поступає до електродвигуна і до лампочки HL1, яка сигналізує про стан включення або виключення двигуна, а потім йде з лампочки на нейтральний провід (N).

Щоб змінити напрямок обертання клапана у зворотний бік, необхідно натиснути кнопки SB2 "Пуск", що встановлює зміну фази і замикає контакт 4 магнітного пускача KM2.2, який також з'єднаний із кнопкою SB3 "Стоп", вмикаючи двигун. Напруга з кнопки SB3 досягає контакту 8 SQ2, після чого напруга подається на контакт 9 магнітного пускача KM2.3. Із магнітного

пускатча напруга через контакт 10 подається на двигун та лампочку HL2, яка подає сигнал на ввімкнення та вимкнення двигуна. З лампочки напруга надходить на нейтральний провід (N).

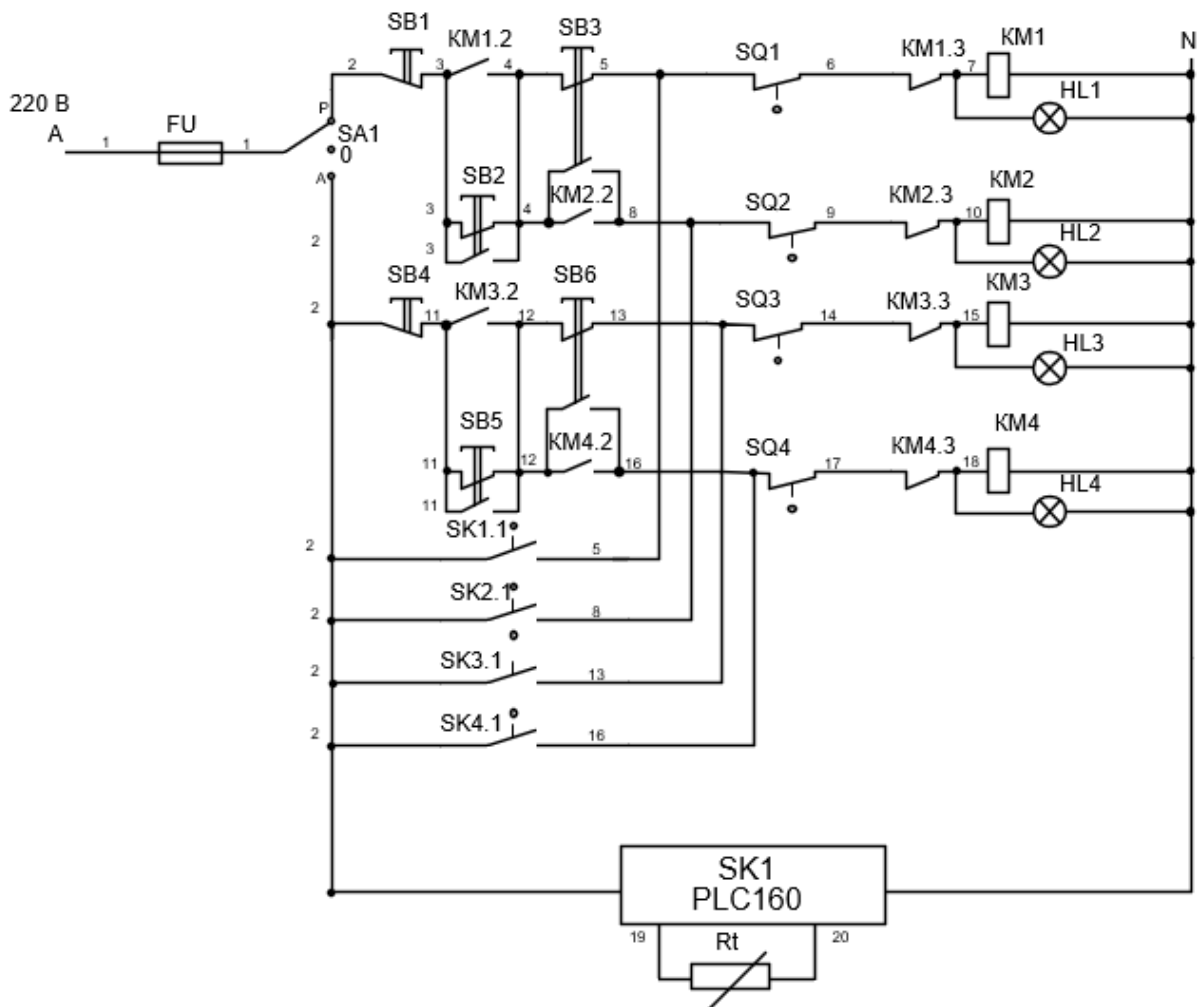


Рис. 5.1. Фрагмент схеми електричної принципової системи керування температурним режимом у біогазовій установці

Автоматичне керування. Переведення системи керування в автоматичний режим здійснюється переведенням перемикача SA1 у положення "А". При цьому подача живлення на контактори електромагнітних пускатів KM1, KM2, KM3 і KM4 здійснюється програмованим логічним контролером SK1. Як уже було зазначено, керування температурою субстрату у біореакторі БГУ здійснюється збільшенням або зменшенням витрати теплоносія (гарячої води), що протікає в трубах системи підігріву субстрату.

Обертанням електроприводів M1 і M2 керує контролер SK1.

Схема видає оптичний сигнал на вмикання і вимикання електродвигуна, який захищений автоматом QF1. Ланцюг керування захищено запобіжником FU1.

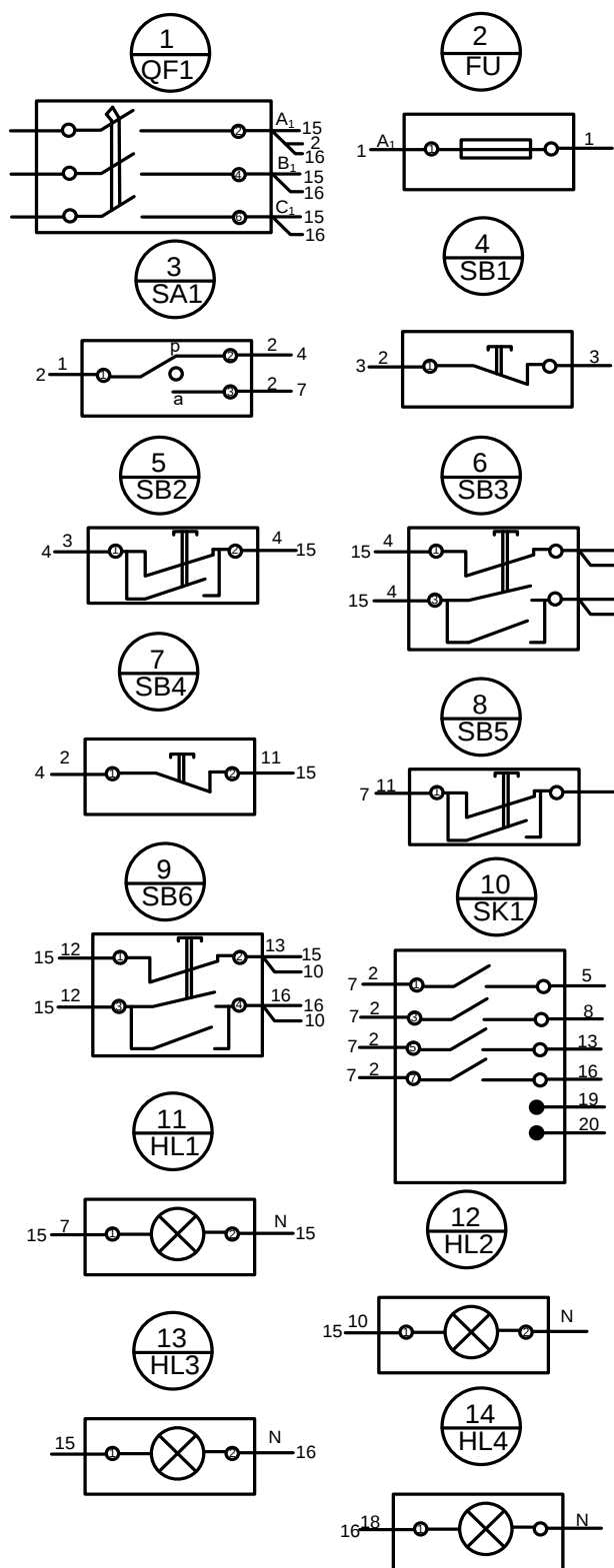


Рис. 5.2. Схема електрична з'єднань (початок)

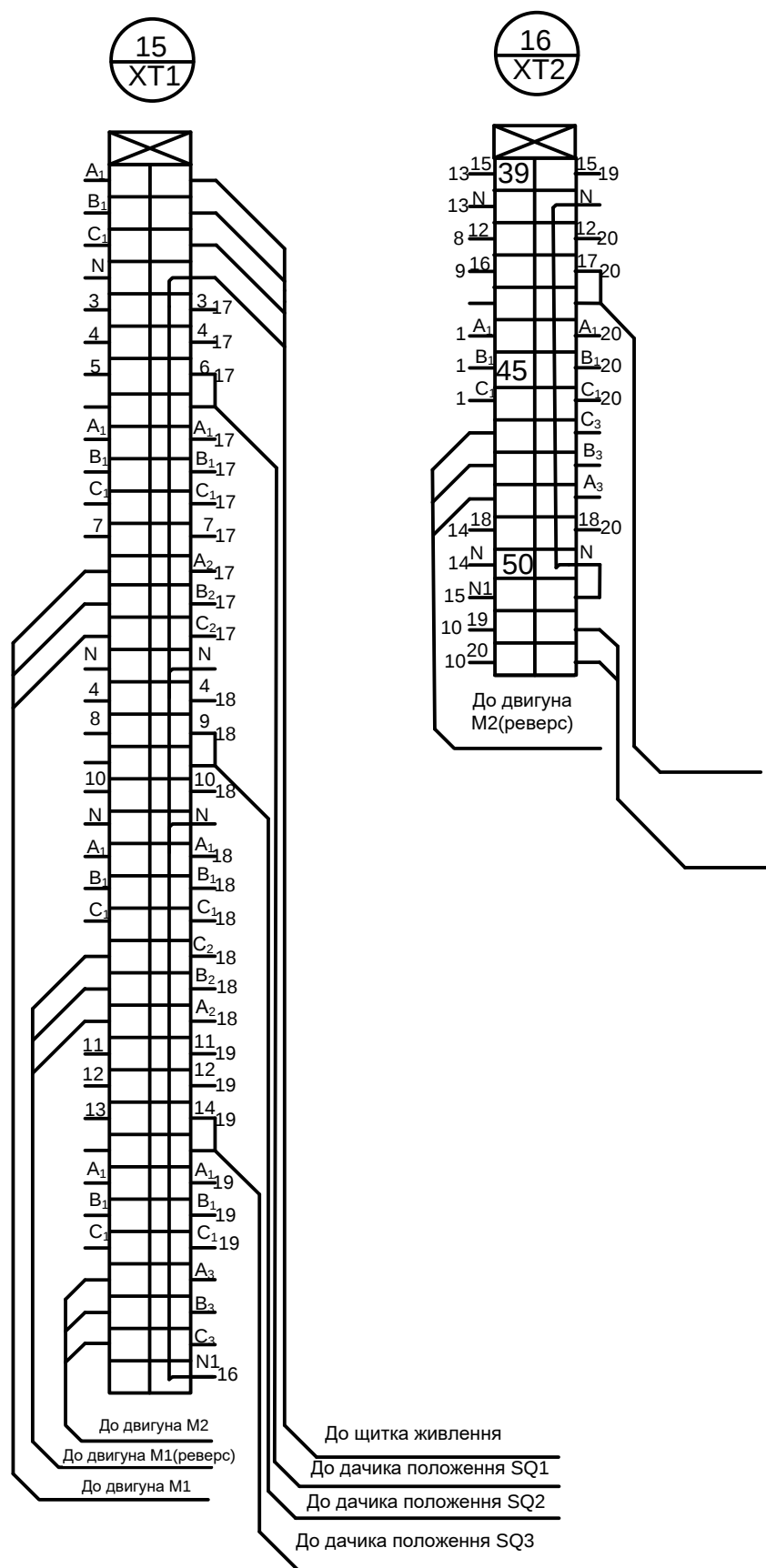


Рис. 5.3. Схема електрична з'єднань (збірка клемних затискачів)

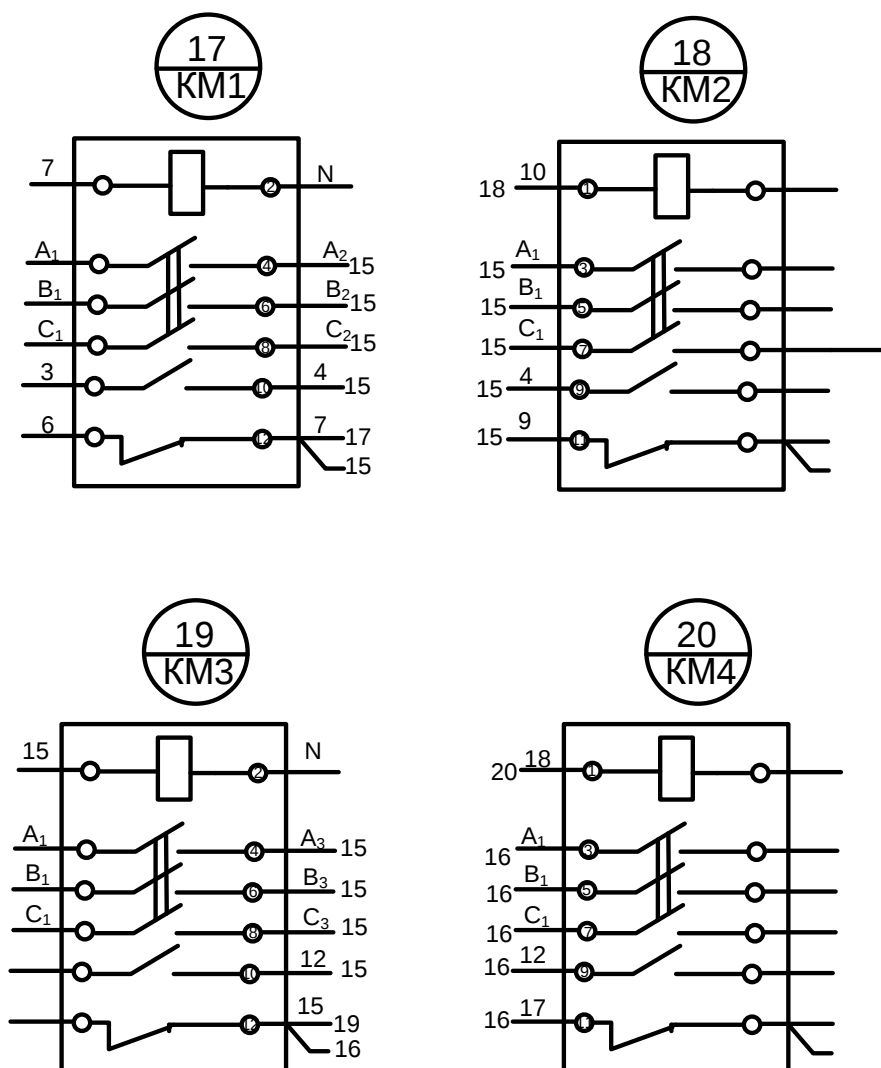


Рис. 5.4. Схема електрична з'єднань (закінчення)

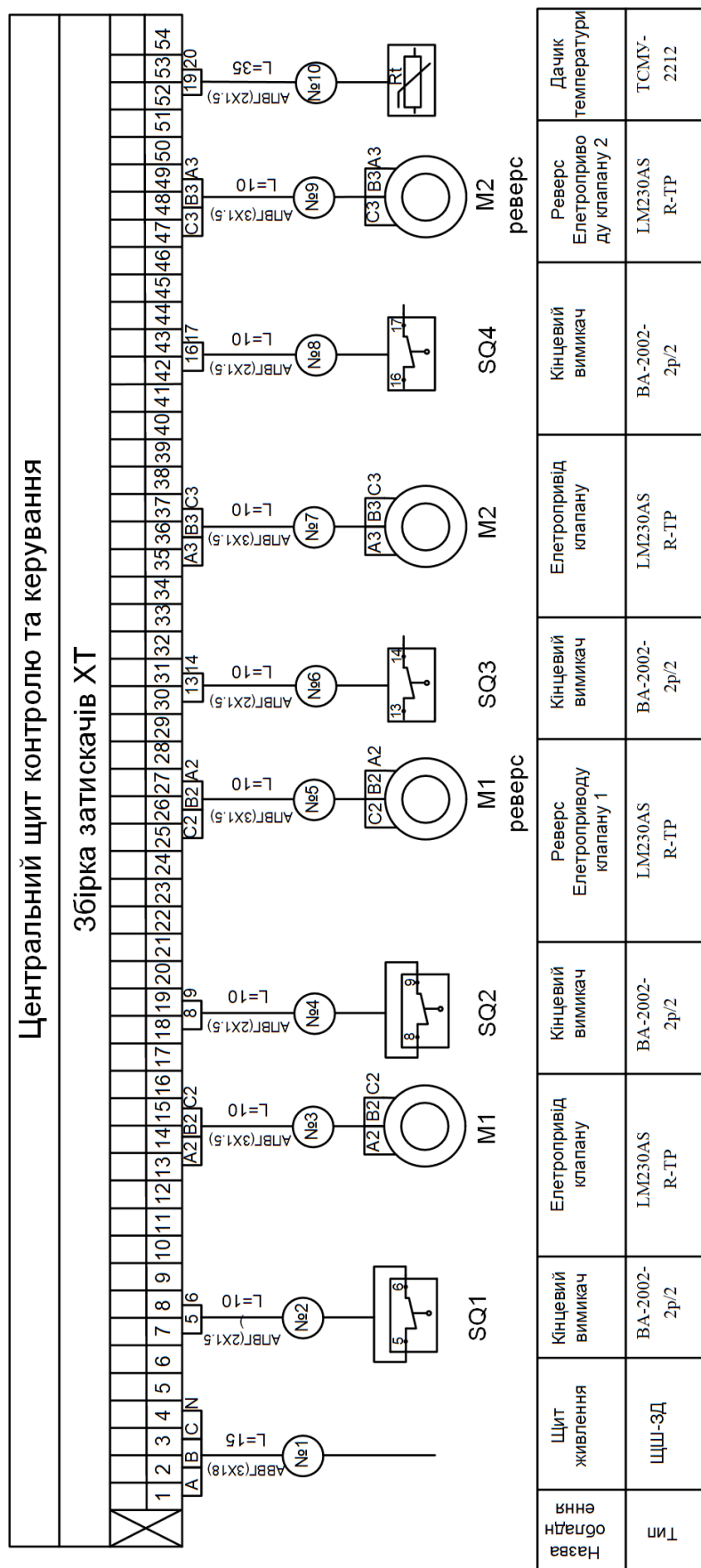


Рис. 5.5. Схема електрична підключень

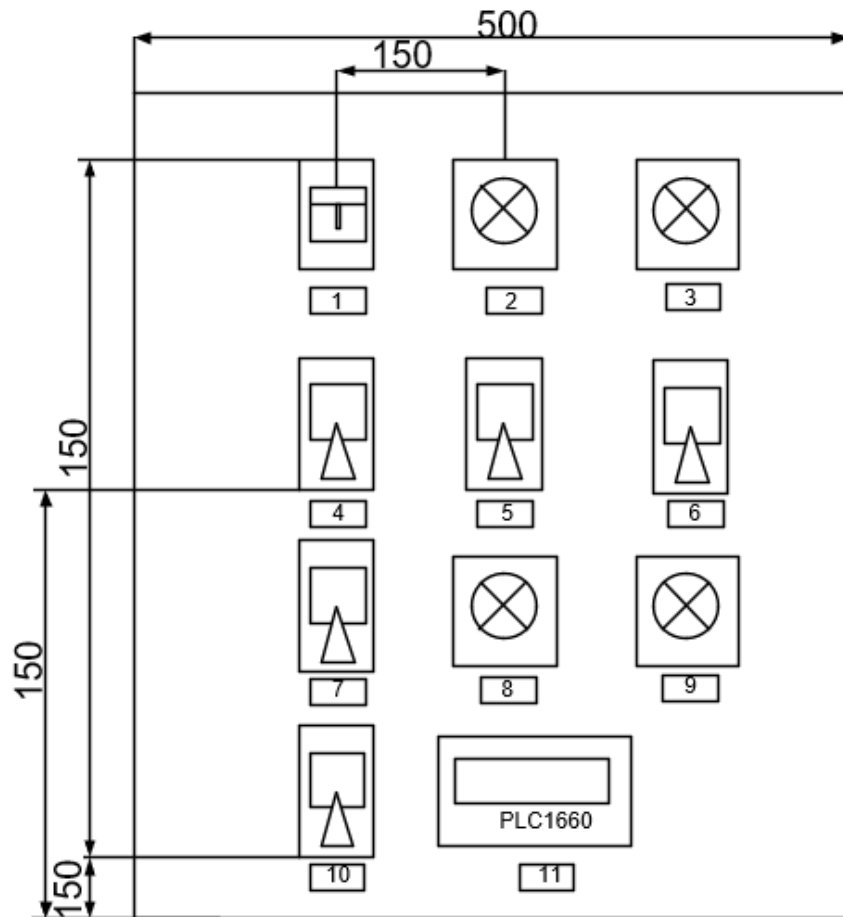


Рис. 5.6. Зовнішній вигляд шафи керування

5.2. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу

Візуалізація – метод подання інформації у вигляді оптичного зображення (наприклад, у вигляді малюнків і фотографій, графіків, діаграм, структурних схем, таблиць, карт і т. д.).

При візуалізації керування використовують такі підходи:

- SCADA SYSTEM (TRACE MODE, Genesis);
- контролер з панеллю оператора;
- контролер з дисплеєм.

Вибір технічних засобів для забезпечення візуалізації залежить від кількості інформації та величини ОК. У разі масштабних об'єктів

використовують SCADA-системи.

SCADA - програмний комплекс для візуалізації та диспетчеризації технологічних процесів. SCADA-система дає наочне уявлення процесу і надає, як правило, графічний інтерфейс оператора для контролю і керування.

Враховуючи об'єм технічних засобів, було виконано візуалізацію інтерфейсу оператора за допомогою SCADA TRACE MODE (AdAstrA), яка є одним з рішень автоматизації технологічних процесів (АСУТП), і розроблено автоматизовану систему контролю та керування температурним режимом у біогазовій установці.

Розроблена SCADA-система дозволяє виконувати головні задачі технологічного процесу керування параметрами виробництва біогазу:

- ефективно керувати та контролювати технологічним процесом;
- забезпечити високий рівень надійності та безпеки;
- оптимізувати витрати енергоресурсів;
- отримувати дані в режимі реального часу;
- мати доступ до проєкту з будь-якого місця;
- реалізувати підсистему підтримки прийняття рішень.

Для візуалізації основних параметрів системи автоматичного керування на головному екрані розміщуємо функціональну схему біореактора з зазначенням не ній основних параметрів: температуру субстрату; температуру води на вході мережі теплопостачання; кут відкриття засувки (рис. 5.7). Окремим графічним елементом позначаємо роботу окремих вузлів: червоний колір – вимкнено, зелений колір увімкнено. Комп'ютерно-інтегрована система керування температурою субстрату в біореакторі передбачає автоматичний режим роботи за замовчанням, але для інженерних налаштувань та аварійних режимів роботи передбачено переведення роботи системи на ручне керування. В додатковому вікні налаштувань можна змінити коефіцієнти регулятора. Також передбачено налаштування роботи насоса і мішалки. Вся інформація з датчиків температури, тиску, вологовмісту та концентрації записується в архів для подальшого можливого опрацювання.

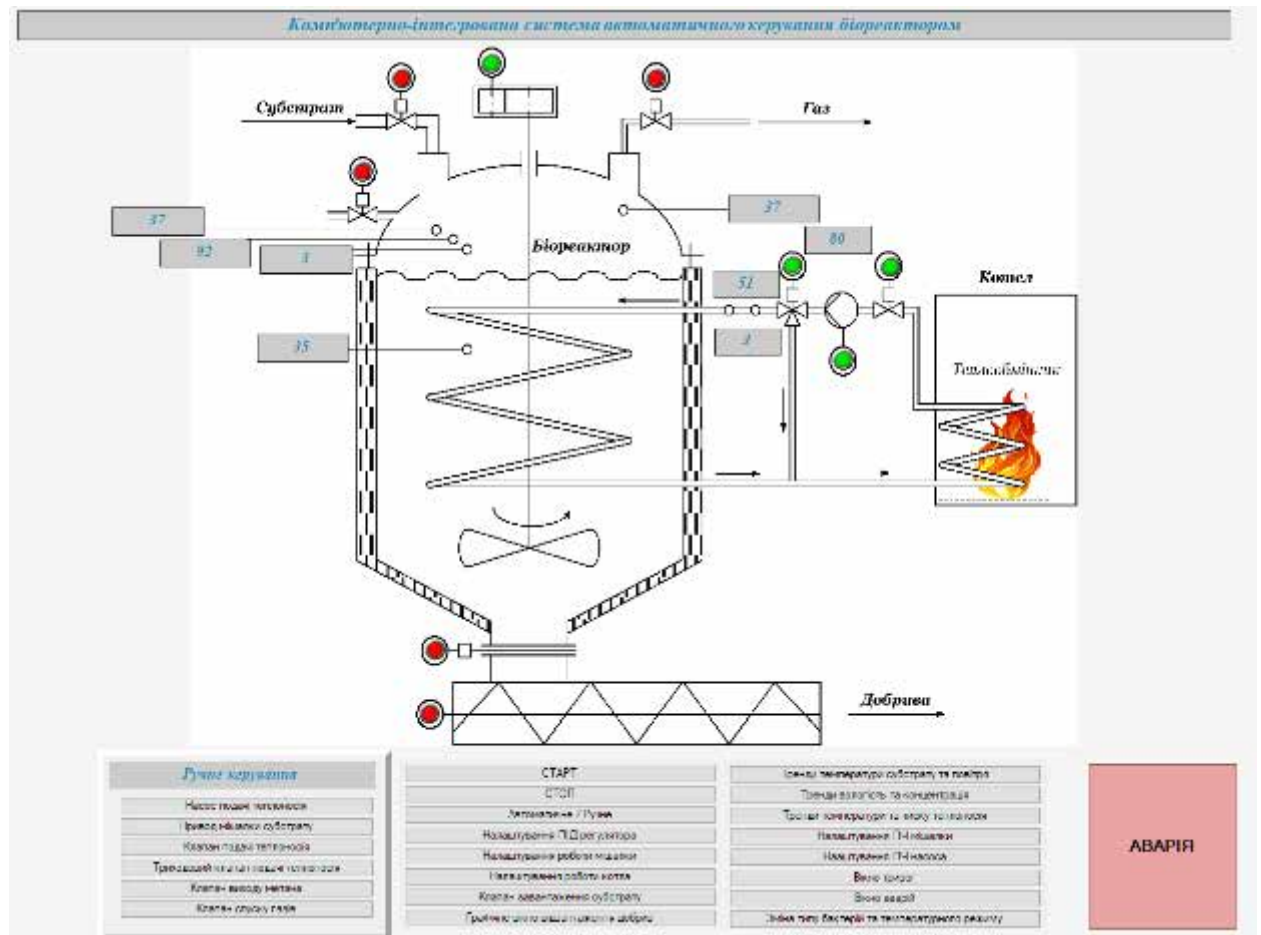


Рис. 5.7. Головний екран комп'ютерно-інтегрованої системи керування температурним режимом у біогазовій установці

5.3. Розрахунок і вибір пускозахисної апаратури та з'єднувальних проводів

Превентивні заходи, як-от увімкнення та вимкнення споживачів електроенергії та ділянок мережі, вимагають наявності пристроїв активації, які захищають від перевантажень і коротких замикань у разі аварійної ситуації.

У цьому випадку для забезпечення безпеки в ланцюгах керування електричними колами було використано запобіжники й автоматичні вимикачі (рис. 5.8).

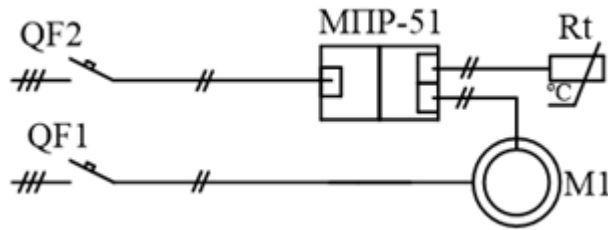


Рис. 5.8. Однолінійна схема підключення електрообладнання САУ
тепловим режимом ТОУ

Умови, необхідні для захисту електроустановок, приведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Умови вибору автоматичних вимикачів

№ п/п	Найменування параметра	Умова вибору
1	Номінальна напруга	$U_{a \text{ ном}} \geq U_{\text{роб max}}$
2	Номінальний струм автомата	$I_{a \text{ ном}} \geq I_{y \text{ ном}}$
3	Номінальний струм теплового розчіплювача	$I_{p \text{ ном}} \geq k_{np} \cdot I_{\text{роб max}}$

Із таблиці видно значення таких параметрів: номінальна напруга мережі ($U_{a \text{ ном}}$) та робоча напруга ($U_{\text{роб max}}$) виражені у вольтах (В); номінальний струм вимикача ($I_{a \text{ ном}}$) та установки ($I_{y \text{ ном}}$) виражені у амперах (А); коефіцієнт надійності розчіплювача (k_{np}) має межі від 1,1 до 1,3; максимальний робочий струм ($I_{\text{роб max}}$) виражений у амперах (А).

Обираємо автоматичний вимикач типу ВА-2002-2р/2 (рис.5.9).



Рис. 5.9 – Автоматичний вимикач УКРЕМ ВА-2002-2р/2.

Автоматичний вимикач УКРЕМ ВА-2002 - це автоматичний вимикач типу " Фаза+Нейтраль ", що відповідає вимогам стандартів ДСТУ 3025-95 і МЕК 60898, зі ступенем захисту IP20.

Ми здійснюємо вибір електричних з'єднувальних проводів.

Електропроводка - це комплекс проводів, кабелів і відповідних кріплень та захисних конструкцій. У стаціонарній електропроводці переважно використовують дроти та кабелі з алюмінієвими жилами. Під час внутрішньої проводки необхідно забезпечити мінімальні протяжність. Перетин струмопровідної жили дроту або кабелю має бути обрано таким чином, щоб забезпечити максимально допустиме нагрівання і достатню механічну міцність.

Під час розрахунку кількості проводів, які необхідно прокласти в одній трубі, нульовий провідник чотирипровідної трифазної системи зазвичай не враховують.

Площу поперечного перерізу провідника обирають з урахуванням максимально допустимого струму, який може протікати через провідник протягом тривалого періоду часу:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{н,роз}}, \quad (5.1)$$

$I_{\text{роз}}$ - це розрахункове значення струму А для даної ділянки електричної мережі.

- Номінальний струм.

$$I_{\text{роз}} = \frac{P_H}{U_{\text{робм}} \cdot \cos \varphi_H} \quad (5.2.)$$

Виконаємо розрахунок для вибору номінального струму проводу:

$$I_H = \frac{12}{220 \cdot 1} = 0,054 \text{ А} \quad (5.3)$$

Для розрахунку вибору проводу будемо використовувати кабель ШВВП (2х0,75) згідно з рисунком 5.10, який має тривалий допустимий струм 12 А: 12 А > 0,054 А



Рис. 5.10. Кабель ШВВП з ПВХ ізоляцією.

Провід ШВВП2х0,75 – силовий провід має дві багатодротяні мідні жили з перерізом 0,75 мм, номінальним навантаженням до 380В/12А та робочою температурою -40°C до +40°C.

РОЗДІЛ 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК ФЕРМЕРСЬКИМИ ГОСПОДАРСТВАМИ

Зброджування органічних речовин у біореакторі БГУ є технологічною основою виробництва біогазу. Дегістат (відпрацьована біомаса, що залишається після процесу анаеробного бродіння органічних відходів у БГУ) є потужним джерелом енергії для живлення мікроорганізмів ґрунтів сільськогосподарського призначення, від здатен істотно покращити їх фізичні властивості. Вказані обставини підвищують ступінь засвоєння вирощуваними культурами поживних речовин. Органічні речовини, що є складовими біодобрих, по-перше, збільшують гігроскопічність та проникність ґрунту, що дозволяє запобігти його ерозії; по-друге, є визначальним чинником життєдіяльності мікроорганізмів, що трансформують ґрунтові поживні речовини у легкозасвоювану для рослин форму.

Для забезпечення ефективного метаногенезу в біореакторі необхідно підтримувати необхідний температурний режим. Залежно від технологічного процесу виробництва біогазу в конкретному господарстві, використовують один із трьох температурних режимів метанового бродіння: *психрофільний, мезофільний, термофільний*.

Враховуючи природно-кліматичні умови більшої частини території України вимоги для виробництва біогазу, фермерським господарствам доцільно використовувати БГУ з *термофільним* режимом роботи.

Для забезпечення енергетичної незалежності фермерського домогосподарства (системи опалення будинку, нагрівання води для потреб побуту та господарської діяльності, приготування їжі) незалежно від пори року, приймемо, що оптимальним (за потребами, за виходом газу, за наявною кількістю біомаси, за фінансовими можливостями) для використання у домогосподарствах є індивідуальна БГУ із об'ємом біореактора 5м³.

Біогазова установка для фермерського або домогосподарства (рис. 6.1) передбачає можливість безперервного завантаження сировини для зброджування, оснащена автоматизованою системою перемішування. Вихід біогазу такої установки становить 12 м^3 при температурі 55°C . Отриманий біогаз містить від 65% метану CH_4 та 35% двоокису вуглецю CO_2 . Для зниження втрат теплоти (зимовий та перехідний період) доцільно розміщення бетонного біореактора у цегляному теплоізованому бункері, що вбудований в ґрунт, радіусом 2,0 - 2,1 м та глибиною 2,2 м.

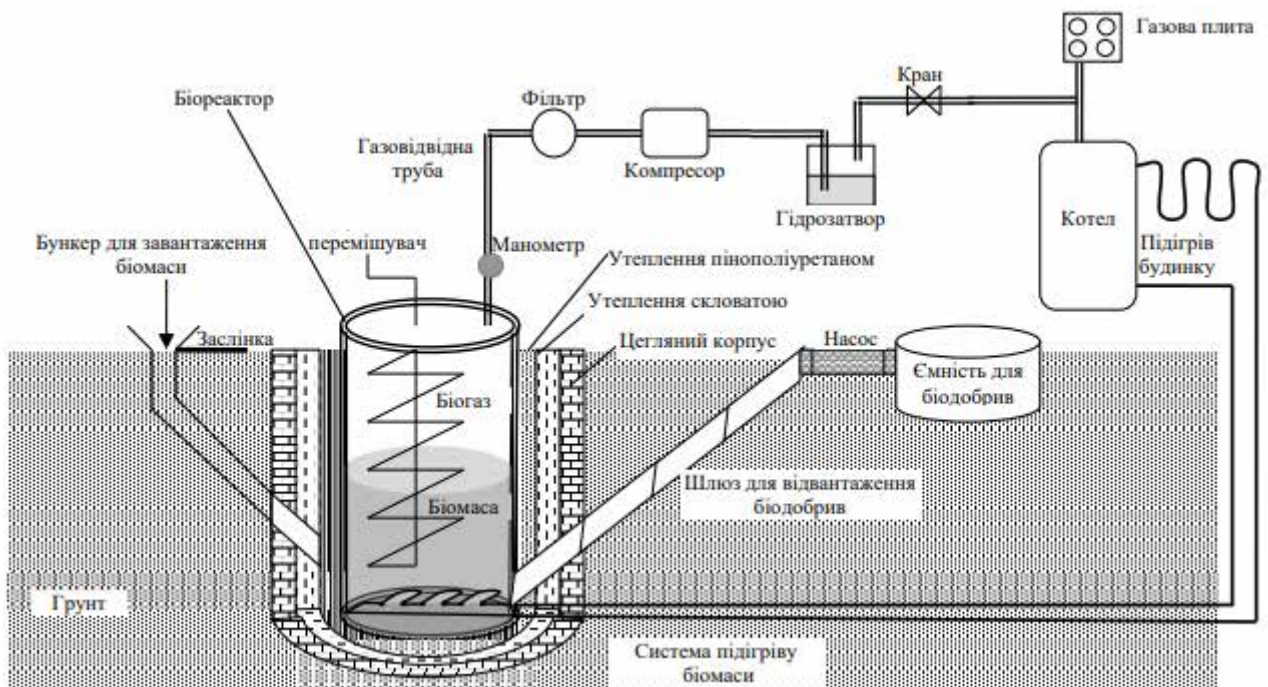


Рис. 6.1. Технологічна схема роботи індивідуальної БГУ в домогосподарстві

Дослідження [32] на основі імітаційного моделювання різних умов розміщення та використання різних теплоізоляційних матеріалів для БГУ в ґрунті теплові втрати в оточуюче середовище знижуються на 26%.

Для забезпечення інтенсивного перемішування субстрату встановлюється система вертикального перемішування. Для можливості довготривалої роботи біологічного реактора бетон повинен мати такі характеристики:

- бути стійким до лужної корозії та до дії сульфатів;
- мінімальний клас міцності С35/45;

- мінімальний вміст цементу 360 кг/м^3 ;
- максимальне співвідношення "вода/цемент" 0,45;
- водонепроникність не менше W8.

Сировина для метанового бродіння, розведена до стану однорідної маси та необхідної вологості, завантажується у біореактор. Об'єм заповнення не повинен перевищувати $2/3$ внутрішнього об'єму реактора. Решта $1/3$ об'єму біореактора буде використана для накопичення біогазу. Для безпечної експлуатації БГУ біореактор оснащується системою керування тиском, що складається із манометра, давача тиску та запобіжного клапану (призначений для видалення у зовнішнє середовище надлишкової кількості газу при перевищенні тиском нормованих значень).

Оскільки, як зазначалося вище, одним із визначальних факторів впливу на продуктивність виробництва біогазу є температура бродіння субстрату, біологічний реактор має бути оснащений системою обігріву (прикладу улаштування таких систем наведених в п. 1.2.4). На рис. 6.1 наведена система, що являє собою набір трубопроводів із циркулюючим теплоносієм (гаряча вода), який встановлений на днищі реактора.

Попереднім етапом проектування описаної БГУ для фермерського господарства є складання кошторису. Для отримання більш-менш коректних результатів економічних розрахунків скористаємося цінами на матеріали станом на січень-лютий 2022 року (за теперішніх умов військового часу ціни на матеріали швидко і непропорційно змінюються).

Отже, для будівництва циліндричного цегляного бункера необхідно близько 1350 шт. цегли загальною вартістю близько 3,6 тис. грн. (умови: радіус реактора 2,0-2,1 м, глибина 2,2 м, кладка в 0,5 цегли товщиною 120 мм і товщиною шва до 10 мм. Вартість цементу за умов прийнятих цін можна оцінити в 0,7 тис. грн. Для покращення теплозбереження необхідно додатково використати теплоізоляційну скловату із орієнтовною вартістю 1,2 тис. грн.

Для теплоізоляції реактора запропонований пінополіуретан – матеріал, який має прийнятний коефіцієнт теплопровідності $0,022 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$, а також

прийнятну стійкість до впливу агресивних речовин і води, зі щільністю 40 кг/м³. Метод використання – напilenня на зовнішню стінку реактора. За допомогою утеплення в такий спосіб утворюється монолітне покриття по усій зовнішній площі реактора без щілин і швів, виникає можливість напilenня шару утеплювача будь-якої товщини. Строк експлуатації пінополіуретану складає близько 50 років, а сам матеріал – екологічно чистим і відноситься до групи горючості ГЗ (не підтримує самостійного горіння). Вартість утеплення пінополіуретаном складає за цінами 2022 р. приблизно 3,0 тис. грн.

Складемо кошторис описаної БГУ (рис. 6.1) з газгольдером, пневматичним завантаженням, системою перемішування субстрату та системою підігріву сировини в реакторі (табл. 6.1).

Таблиця 6.1.

Кошторис будівництва БГУ в домогосподарствах

№ поз.	Складові частини БГУ	Орієнтовна вартість, тис. грн.
1	Біогазова установка	
	Реактор	13,5
	Бункер завантаження біомаси	0,1
	Фільтр	0,3
	Перемішувач	0,1
	Компресор	1,5
	Манометр	0,2
	Шлюз для завантаження сировини та вивантаження дегістату (пластикові труба діаметром 0,5 м)	1,3
	Насос	2,0
	Пластикові труби системи підігріву субстрату (діаметр 32 мм)	0,4
	Труба для відведення газу	0,2
	Запобіжний гідравлічний клапан	0,1
	Кран	0,2
2	Цегляний бункер	
	Цегла	3,6
	Цемент	0,7
	Улаштування утеплення та теплоізоляції	
	Пінополіуретан	3,0
	Скловата	1,2
	Разом	28,4

Отже, за наведеним кошторисом, загальна вартість біогазової установки складає 28,4 тис. грн., що може бути доступним для фермерського господарства із невеликим розміром доходу.

Для того, щоб обчислити строк окупності, необхідно розрахувати витрати в частині енергонезалежності домогосподарства. Оскільки вони, крім утримання тварин, можуть займатись також рослинництвом, побічною продукцією якого є бур'ян, сіно або солома, інші рослинні відходи, доцільно розглянути роботу БГУ при завантаженні її комплексним субстратом.

Для оцінки доцільності будівництва БГУ, необхідно по-перше, спланувати потребу в біогазі домогосподарством, по-друге, визначити необхідну кількість рослинної біомаси та кількість утримуваних тварин та їх вид (птиця, ВРХ, свині).

При обчисленнях при плануванні сировини для ефективної роботи БГУ у фермерському домогосподарстві спираємося на те, що теплотворна здатність 1 м³ біогазу еквівалентна вказаному показнику 0,65 м³ природного газу.

В домогосподарствах в опалювальний період, зазвичай, опалюється не весь будинок, а окремі приміщення, при цьому витрати природного газу складають протягом 1 місяця 3,8-4,0 м³ на 1 м² площі будинку.

Для опалення, нагрівання води, підтримки стабільного температурного режиму в БГУ (тобто для забезпечення енергетичної незалежності за рахунок БГУ) у домогосподарстві, де мешкає до 5 осіб, об'єм реактора установки повинен складати не менше 5 м³.

Оскільки показник енергетичної цінності гною відрізняється для різних видів тварин, відповідно і вихід біогазу з різних тваринних відходів є різним. Так, вихід метану при зброджуванні пташиного посліду в середньому становить 0,41 м³/кг, зі свинячого гною – 0,54 м³/кг, з гною ВРХ – 0,28 м³/кг. Неоднаковим є вихід метану і при зброджуванні рослинної біомаси: для стебел кукурудзи цей показник складає 0,4 м³/кг, для трави – 0,44 м³/кг, для силосних відходів – 0,22 м³/кг, а для соломи – 0,3 м³/кг [33].

Прийmemo наступні початкові показники:

- протягом опалювального сезону будуть використані силосні відходи, гній свинячий та ВРХ, пташиний послід (вихід біогазу із субстрату із названих видів сировини складає $0,37 \text{ м}^3/\text{кг}$;

- протягом літнього періоду буде використаний бур'ян, зелена маса кукурудзи, гній свинячий та ВРХ, пташиний послід (вихід біогазу із суміші таких видів біосировини дорівнюватиме близько $0,41 \text{ м}^3/\text{кг}$) [33].

Отже, отримаємо дані початкової планової кількості сировини для наших умов (табл. 6.2).

Таблиця 6.2.

Планова кількість сировини для ефективної роботи БГУ
у фермерському домогосподарстві (при об'ємі реактора 5 м^3)

Площа будинку площа, м^2	Опалю- вана площа, м^2	Період	Потреба природного газу, $\text{м}^3/\text{місяць}$	Потреба біогазу, $\text{м}^3/\text{місяць}$	Потреба біогазу, $\text{м}^3/\text{добу}$	Вихід біогазу, $\text{м}^3/\text{кг}$	Потреба сировини, $\text{кг}/\text{добу}$
60	40	Опалю- вальний період	152-160	233,8- 246,2	7,8-8,2	0,37	21,1-22,2
	-	Міжопалю- вальний період	20	30,8	1,0	0,41	2,5
80	50	Опалю- вальний період	190-200	292,3- 307,7	9,7-10,3	0,37	26,3-27,7
	-	Міжопалю- вальний період	20	30,8	1,0	0,41	2,5-2,8
100	60	Опалю- вальний період	228-240	350,8- 369,2	11,7- 12,3	0,37	31,6-33,3
	-	Міжопалю- вальний період	20	30,8	1,0	0,41	2,5-2,8

Аналіз наведених у табл. 6.2 даних свідчить, що біогазова установка (БГУ) з корисним об'ємом біореактора $V_p = 5 \text{ м}^3$ забезпечує покриття термічних та енергетичних потреб автономного децентралізованого домогосподарства з корисною площею житлового фонду до 100 м^2 протягом опалювального періоду.

За номінального середньодобового виходу газоподібного енергоносія на рівні $V_6 = 12 \text{ м}^3/\text{добу}$ було здійснено градієнтний перерахунок добової потреби в паливі з урахуванням фактору сезонної нерівномірності споживання. У результаті моделювання встановлено, що для безперебійного функціонування локальної енергосистеми протягом річного циклу необхідна масова витрата вихідної біосировини (субстрату) становить:

$$m_{\text{сир}} = 21,1 \dots 33,3 \text{ кг/добу}.$$

Конкретна кількість сировини в межах вказаного інтервалу прямо-пропорційно залежить від архітектурно-планувальних параметрів та теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій будівлі.

Верифікація джерел біомаси та нормативні показники виходу екскрементів

Для визначення мінімально необхідного поголів'я тварин та об'єму рослинних ко-субстратів, що здатні згенерувати розраховану масу сировини, проаналізуємо нормативно-технічні питомі показники виходу екскрементів тваринництва та птахівництва (табл. 6.3).

Таблиця 6.3.

Фізико-хімічні та кількісні характеристики вихідних каналів біосубстратів [34]

Біологічна група / вид тварин	Добовий вихід екскрементів, % від живої маси	Абсолютний добовий вихід екскрементів, кг/голову	Відносна вологість субстрату, %
Велика рогата худоба (ВРХ)	8...10%	40...55	85...92%
Свині	6...8%	8...10	86...91%
Свійська птиця (на 100 голів)	—	25	56...60%

З метою забезпечення гарантованого інженерного запасу стійкості САК біореактора, при розрахунках було прийнято екстремальні (мінімальні нормативні) значення виходу екскрементів. Матеріальний баланс зорієнтовано виключно на критичний зимовий (опалювальний) період. За такої умови у літній фазі виникатиме стійкий профіцит генерації біогазу, а додаткова

інтродукція фітомаси (відходів рослинництва) у міжсезоння виступатиме інтенсифікуючим чинником, що підвищує сумарний вихід метану завдяки вищій питомій ентальпії зброджування вуглеводневих компонентів.

У межах дослідження розроблено та верифіковано два альтернативні структурні варіанти формування сировинної бази домогосподарства (табл. 6.4):

- **Варіант I:** Комбіноване утримання великої рогатої худоби (ВРХ) та свійської птиці;
- **Варіант II:** Комбіноване утримання свиней та свійської птиці.

Таблиця 6.4.

Розрахунок кількості утримуваних тварин для забезпечення роботи біогазової установки (комплексно) в домогосподарстві

Площа будинку, м ²	Необхідна сировина, кг/добу	Кількість голів, при виході сировини з 1 голови (мінімальне значення)			
		I варіант		II варіант	
		ВРХ (40 кг/добу)	Птахів (0,25 кг/добу)	Свиней (8 кг/добу)	Птахів (0,25 кг/добу)
60	21,1-22,2	1	5	3	10
80	26,3-27,7	1	10	4	20
100	31,6-33,3	1	10	5	20

Зіставлення розрахункових даних із результатами, наведеними в табл. 6.4, показує, що для стабільного завантаження БГУ об'ємом 5 м³ достатньо мати такий мінімальний склад тваринницького комплексу:

- **За варіантом I:** 1 корова та щонайменше 10 голів птиці;
- **За варіантом II:** 5 свиней та не менше 20 голів птиці.

Техніко-економічний аналіз та інвестиційна привабливість проекту

Оскільки запропонована конфігурація БГУ повністю вирішує детерміновані завдання енергонезалежності та автономізації домогосподарства, було здійснено комплексний розрахунок динамічних показників інвестиційної ефективності та терміну окупності системи ($T_{ок}$, років), результати якого зведено в табл. 6.5.

Інтегральний аналіз економічних метрик свідчить, що дисконтований термін окупності капітальних вкладень у БГУ перебуває в межах:

$$T_{\text{ок}} = 2,6\text{--}3,8 \text{ років}$$

Таблиця 6.5.

Розрахунок терміну окупності біогазової установки в домогосподарстві

Площа / опалю- вана площа, м ²	Період	Потреба природно го газу, м ³ /місяць	Потреба газу, м ³ /рік	Вартість газу (6,95 грн/м ³), грн	Разом витрат за рік, грн	Термін окупнос- ті, років
60/40	Опалювальний період (6 міс)	160	960	6672	7506,0	28400/75 06,0= 3,8
	Міжопалю- вальний період (6 міс)	20	120	834		
80/50	Опалювальний період (6 міс)	200	1200	8340	9174,0	28400/91 74,0= 3,1
	Міжопалю- вальний період (6 міс)	20	120	834		
100/60	Опалювальний період (6 міс)	240	1440	10008	10842, 0	28400/10 842,0=2, 6
	Міжопалю- вальний період (6 міс)	20	120	834		

Слід підкреслити, що при розрахунку чистого дисконтованого доходу (NPV) необхідно враховувати додатковий внутрішній ендегенний ефект: анаеробний ефлюент (дигестат), що утворюється на виході біореактора, є високоякісним концентрованим біодобривом, збагаченим мінералізованими формами азоту (NH₄⁺), фосфору та калію. Внесення дигестату повністю нівелює потребу в закупівлі комерційних мінеральних домішок та агрохімікатів. Цей фактор суттєво мінімізує операційні витрати, генерує додатковий грошовий потік та екстраполює зміщення терміну окупності до нижньої межі (2,6 року).

Впровадження локальних БГУ дозволяє досягти синергетичного ефекту, одночасно вирішуючи комплекс завдань у суміжних секторах (рис. 6.2) [35].

Соціальні та екологічні аспекти та інтеграція в концепцію сталого розвитку

Сучасний стан світової та національної економічних систем, дефіцитарність традиційних викопних паливно-енергетичних ресурсів та стрімка ескалація кліматичних змін вимагають інтенсифікації пошуку та впровадження альтернативних джерел енергії. Реалізація відновлюваного потенціалу дозволяє диверсифікувати паливний баланс і знімати критичну імпортозалежність від нафтопродуктів та природного газу.

Україна володіє значним сировинним профіцитом нетрадиційних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на базі лігноцелюлозних рослинних залишків та біологічних відходів тваринництва. Попри високий потенціал, рівень промислового освоєння цих ресурсів залишається незадовільним. В умовах постійного зростання тарифів на традиційні енергоносії, анаеробна термофільна або мезофільна конверсія біомаси в реакторах БГУ виступає одним із найбільш збалансованих технологічних рішень. Цей процес дозволяє здійснювати керовану деструкцію суміші субстратів з одночасною сепарацією горючого біогазу (із вмістом CH_4 до 60...70%) та стабілізованого органо-мінерального комплексу [33].

Окрім очевидних та легко вимірюваних екологічних та фінансових результатів, суттєве значення має інтегральний соціальний ефект від масової біогазифікації сільських територій. Зазначений фактор полягає в кардинальному покращенні санітарно-гігієнічних умов проживання населення, зниженні рівня захворюваності завдяки дезодорації відходів та ліквідації підшкірного вимивання нітратів у водоносні горизонти (рис. 6.2).

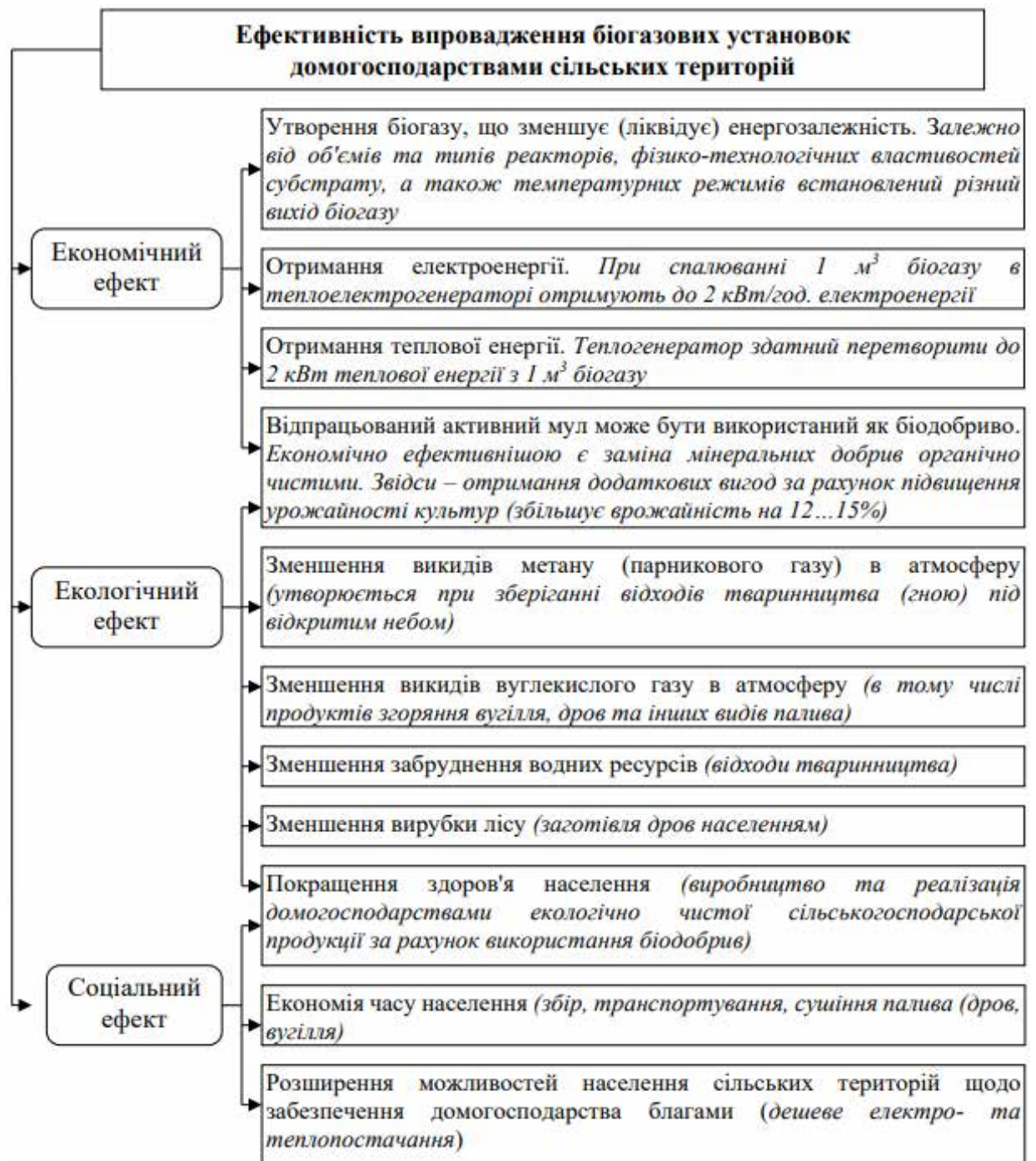


Рис. 6.2. Ефективність впровадження біогазових установок домогосподарствами сільських територій

Структуру переваг використання біогазових технологій можна класифікувати за такими домінантними векторами:

- **Екологічний вектор:** Ефективна утилізація та знешкодження концентрованих органічних відходів агропромислового комплексу

(АПК); глибока термічна дезінфекція та дегельмінтизація гною; зниження емісії парникових газів (CH_4 , CO_2) у стратосферу.

- **Агрохімічний та економічний вектор:** Локальне виробництво екологічно чистих, збалансованих за фракційним складом органічних добрив; суттєва децентралізована економія капітальних витрат на інфраструктурну газифікацію та прокладання магістральних мереж до віддалених населених пунктів.
- **Соціально-виробничий вектор:** Підвищення рівня загальної енергобезпеки та автономності сільських територій; стимулювання створення нових робочих місць; диверсифікація та підвищення рентабельності змішаного тваринництва.

ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянута біогазова установка як технологічний об'єкт управління для виробництва біогазу. Розроблена система автоматичного управління температурою процесу анаеробного бродіння у реакторі з метою підвищення ефективності функціонування даного об'єкта і покращення виробництва.

Після проведеного аналізу стану сучасних технологій утилізації відходів сільськогосподарського виробництва встановлено, що найбільш енергозберігаючим є перероблення органіки на біогаз, яке дозволяє децентралізувати енергоспоживання та отримати екологічно якісні добрива. На сьогоднішній день існує багато технологічних рішень для проектування біогазової установки, але відсутні науково-обґрунтовані рекомендації параметрів автоматизації та вибору робочих органів для нагрівання субстрату з метою температурної стабілізації анаеробного процесу при безперервній подачі сировини до реактора установки.

Розрахунок математичних та створення імітаційних моделей дозволяє отримати температурні показники проходження процесу анаеробного бродіння у віртуальному режимі, що в свою чергу дає можливість вибрати оптимальний режим отримання біогазу спостерігаючи за результатами зміни вхідних параметрів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Abbasi T., Tauseef S.M., Abbasi S.A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation – An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012. Vol. 16. P. 3228–3242.
2. Halgang S. Biofuels in France: What Developments? // *World Biofuels* (2022, 23-24 April, Seville). 2022 – P.10-14.
3. Дубровін В.О. Розвиток технологій використання рослинницької продукції на енергетичні потреби в Україні // *Аграрна наука і освіта.* – 2004. – Т.5, №1-2. – С.86-91.
4. Калетнік Г.М., Здирко Н.Г., Фабіяньська В.Ю. Біогаз в домогосподарствах – запорука енергонезалежності сільських територій України. Вінниця: Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики, 2018. № 8. С. 7-22.
5. Nasir I.M., Mohd Ghazi T.I.M., Omar R. Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Eng. Life Sci.* 2012. Vol. 12. P. 258–269.
6. Сотник І.М. Еколого-економічні механізми мотивації ресурсозбереження. Монографія. Суми: ВВП «Мрія» ТОВ, 2008. – 330 с.
7. Єлізаров О.І., Лисенко О.І., Отримання біогазу з опалого листя. Кременчук: Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, 2013. Вип.81, №4. С. 166-169.
8. Попик О.В. Еколого-економічні аспекти поводження з опалим листям на урбанізованих територіях. Економічні інновації: Зб. наук. праць. Одеса: ІПРЕД НАН України, 2014. Вип. 58. С. 266-272.
9. Запорожець О.І., Савченко В.І., Карабцов Г.П., Соловейкіна А.К. Паливо з біомаси на основі опалого листя. Київ : Вісник національного авіаційного університету, 2010. № 1. С. 185-190.
10. Дубровін В.О., Корчемний М.О., Масло І.П., Шептицький О., Рожковський А., Пасторек З., Гжибек А., Євич П., Амон Т., Криворучко В.В. Біопалива (технології, машини і обладнання). Київ: ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 137 с.
11. Нікітін Г.А. Метанове зброджування у біотехнології. – К.: Вища школа, 2000. – 207 с.
12. Промислове виробництво біогазу. [Електроний ресурс] – Режим доступу: <https://utc.bio/biogazovi-kompleksy/promyslove-vyrobnyctvo-biogazu/>
13. Огляд сучасного стану виробництва біогазу в Європі / Йенс Бо Гольм Нільсен, Теодоріта Аль Сеаді // *Пропозиція.* – 2012 р. - №11. – С.80-82.
14. Сільськогосподарські біогазові установки: закордонний досвід / В. Клименко // *Техніка АПК.* – 2006. - №6-7.
15. Корчемний М.О., Федорейко В.С., Щербань В.В. Енергозбереження а агропромисловому комплексі. – Тернопіль: Підручники та посібники, 2001. – 984 с.

16. Biogasanlagen richtig füttern. Erzeugung, Lagerung und Verwertung von Energiepflanzen für Biogasanlagen – AGRAVIS Raiffeisen AG, 2006.—46 p.
17. Чучуй В.П. Альтернативні джерела енергії: Навч. посібн. для студ. вищ. учб. закл. / В.П. Чучуй, С.М. Уминський, С.В. Інютін; Одеський держ. аграрн. ун-т. – Одеса: ТЕС, 2015. – 495 с.
18. Deublein D., Steinhauser A. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. 450 p.
19. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В., Анохіна К.В. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання. Вінниця: ВНТУ, 2010. – 170 с.
20. Modeling the Efficiency of Biogas Plants by Using an Interval Data Analysis Method. *Energies*, 2024, 17(14), 3537. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en17143537>
21. Семененко І.В. Проектування біогазових установок. – Суми: Мак-Дей: Мрія-1, 2006. – 347 с.
22. Feng R., Li J., Dong T., Li X. Performance of a novel household solar heating thermostatic biogas system. *Appl. Therm. Eng.* 2016, Vol. 96. P. 519–526.
23. Семінський О. О., Мазепа Ю. В. Дослідна установка для одержання біогазу з відходів целюлозно-паперового виробництва. VI Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів": тези доп. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. С. 96.
24. Rashed M. B. The Effect of Temperature on the biogas Production from Olive Pomace. *University Bulletin, ISSUE*. 2014. Vol. 3, No 16. P. 135-148.
25. Development of a simple biogas analyzer module (BAM) for real-time biogas production monitoring. Luciano de Melo, Ianny Andrade Cruz and others. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2235457>
26. Аналіз метаноутворення в біогазових установках / [Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Войтенко В.О., Гох В.В.]: – Сучасні проблеми збалансованого природокористування: Збірник наукових праць / Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ); Науковий редактор: Бахмат М.І. – Кам'янець-Подільський, 2012. – Спец. випуск до VII науково-практичної конференції. – 334 с. – С. 141–145.
27. Лисенко В.П., Болбот І.М., Шворов С.А., Коваль В.В., Заєць Н.А., Лендел Т.І., Наконечна К.В., Болбот А.І. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи магістрів: Навчальний посібник. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2023. – 462 с.
28. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів / В.П. Лисенко, Є.В. Чернищенко, В.М. Решетюк, В.О. Мірошник, Н.А. Заєць – К.: АграрМедіаГруп, 2016. – 476 с.
29. Основні методи і методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра / В.П. Лисенко, А.О. Дудник, В.О. Мірошник, А.А. Руденський, Н.А. Заєць. – Київ: "Компринт". 2023. – 303 с. для студентів зі спеціальності 151 – "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

30. ПЛК160[U22]. Програмований логічний контролер.
[Електроний ресурс] – Режим доступу:
<https://aqteck.ua/ua/programovani-logichni-kontrolery/plk160-m02-programovanyj-logichnyj-kontroler>
31. В.П. Лисенко, І.М. Болбот, В.А. Наливайко, К.В. Наконечна, Т.І. Лендел, Д.Є. Жук. Проектування систем автоматизації для АПК: Підручник. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2022 – 626 с.
32. Семененко І.В. Проектування біогазових установок. – Суми: Мак-Дей: Мрія-1, 2006. – 347 с.
33. Виробництво біогазу в сільському господарстві України / Шацький В.В., Мовсесов Г.Є., Павліченко В.М. // Науковий вісник НАУ. – Вип. 73. – К.: Вид-во НАУ, 2004. – С. 104-108.
34. Ткаченко С. Й. Методичні основи моделювання системи термостабілізації реактора біогазової установки / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Резидент Н. В. // Праці за матер. IV всеукр. наук–техн. конф. «Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві». – Вінниця. – 2004. – С. 70–79.
35. Лінник М.К. Шляхи енергозбереження у сільському господарстві // Агротехсервіс. – 1996. - №8-9.
36. Системи метанового зброджування.
[Електроний ресурс] – Режим доступу:
https://pidru4niki.com/73009/ekologiya/sistemi_metanovogo_zbrodzhuvanny_a#617