

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
ПОГОДЖЕНО**

Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

(назва ННІ)

проф., д.т.н. _____ **В.В. Каплун**

(підпис)

(ПІБ)

«___» _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри автоматики

та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

доц., к.т.н. _____ **О.О. Опришко**

(підпис)

(ПІБ)

«___» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ
СУБСТРАТИВ У ВИРОБНИЦТВІ БІОГАЗУ»**

Спеціальність:

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

(шифр і назва)

Освітня програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(назва)

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

(назва)

Гарант освітньої програми

_____ **д.т.н., професор**

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Іващук В.В.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ К.Т.Н., ДОЦЕНТ (науковий ступінь та вчене звання)	_____ (підпис)	_____ (П.І.Б)	Дудник А. О.
Виконав	_____ (підпис)	_____ (П.І.Б студента)	Полевік В.О.

КИЇВ-2026

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

К.Т.Н., ДОЦ. _____ **О.О. Опришко**
« ____ » _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Полевіку Владиславу Олександровичу

Спеціальність:

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

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Інтелектуальна система для аналізу якості субстратів у виробництві біогазу»,

затверджена наказом від 22.10.2025 № 2440 «С»

Термін подання студентом магістерської роботи 22.05.2026 року

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

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести системний аналіз біогазової установки як об'єкта керування з визначенням основних параметрів та взаємозв'язків.
2. Розробити математичну модель процесу метаногенезу в біогазових ферментаторах для ідентифікації динамічних характеристик каналів регулювання.
3. Обґрунтувати та синтезувати алгоритм інтелектуального керування.
4. Інтегрувати розроблену нейромережеву модель прогнозування виходу біогазу у веб-застосунок для підтримки прийняття рішень персоналом.

Дата видачі завдання «22» жовтня 2025 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(Підпис)

Дудник А. О.

(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(Підпис)

Полевик В.О.

(Прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Інтелектуальна система контролю якості субстрату в біогазовій установці

У роботі розглядається розробка та впровадження інтелектуальної системи моніторингу і контролю якості субстрату в біогазових установках на основі методів машинного навчання та нечіткої логіки. Актуальність дослідження обумовлена зростанням попиту на відновлювані джерела енергії та необхідністю підвищення ефективності анаеробного зброджування органічних відходів.

Метою роботи є створення інтелектуальної системи, що забезпечує автоматичний контроль ключових параметрів субстрату — вмісту сухої речовини (TS), летких сухих речовин (VS), рівня pH, температури, концентрації летких жирних кислот (VFA) та співвідношення C/N — з метою оптимізації виходу біогазу та запобігання збоєм у роботі реактора.

У процесі дослідження застосовано методи штучних нейронних мереж для прогнозування виходу метану залежно від складу субстрату, а також алгоритми нечіткого виведення для прийняття рішень щодо корекції параметрів процесу в режимі реального часу. Система інтегрована з датчиками IoT, що дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг та передачу даних до хмарної платформи обробки.

Отримані результати свідчать про підвищення ефективності виробництва біогазу на 12–18% порівняно з традиційними методами управління процесом, а також про зниження ризику закислення реактора завдяки своєчасному виявленню відхилень у складі субстрату. Запропонована система демонструє високу точність прогнозування ($R^2 \geq 0,94$) та може бути адаптована до різних типів органічної сировини.

Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи на промислових біогазових підприємствах з метою автоматизації технологічного процесу, скорочення експлуатаційних витрат та підвищення стабільності роботи установки.

Ключові слова: біогазова установка, анаеробне зброджування, контроль якості субстрату, інтелектуальна система, нейронна мережа, нечітка логіка, IoT, моніторинг параметрів, оптимізація виходу метану.

ANNOTATION

Intelligent Substrate Quality Control System for a Biogas Plant

This paper addresses the development and implementation of an intelligent monitoring and quality control system for substrate in biogas plants, based on machine learning methods and fuzzy logic. The relevance of the study is driven by the growing demand for renewable energy sources and the need to improve the efficiency of anaerobic digestion of organic waste.

The aim of the work is to create an intelligent system that provides automatic control of the key substrate parameters — total solids (TS), volatile solids (VS), pH level, temperature, volatile fatty acid (VFA) concentration, and C/N ratio — in order to optimize biogas yield and prevent reactor failures.

The study employs artificial neural network methods for predicting methane yield depending on substrate composition, as well as fuzzy inference algorithms for real-time decision-making regarding process parameter correction. The system is integrated with IoT sensors, enabling remote monitoring and data transmission to a cloud-based processing platform.

The results obtained indicate an increase in biogas production efficiency of 12–18% compared to conventional process management methods, as well as a reduction in the risk of reactor acidification through timely detection of deviations in substrate composition. The proposed system demonstrates high prediction accuracy ($R^2 \geq 0.94$) and can be adapted to various types of organic feedstock.

The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the developed system at industrial biogas enterprises in order to automate the technological process, reduce operating costs, and improve the operational stability of the plant.

Keywords: biogas plant, anaerobic digestion, substrate quality control, intelligent system, neural network, fuzzy logic, IoT, parameter monitoring, methane yield optimization.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
1.1 Сучасний стан розвитку біогазової галузі.....	9
1.2 Фізико-хімічні параметри субстратів та їх вплив на якість біогазу	10
1.2.1 Основні параметри якості субстратів	10
1.2.2 Вплив субстратного складу на вихід біогазу	12
1.3 Огляд методів інтелектуального аналізу у біогазовій галузі	12
1.3.1 Нейронні мережі для прогнозування виходу біогазу.....	12
1.3.2 Ансамблеві методи	13
1.3.3 Методи виявлення аномалій у параметрах субстратів	13
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	14
2.1 Математична модель об'єкта за результатами теоретичних досліджень...	15
2.2.1 Активний експеримент для моделювання.....	16
2.3 Розробка та дослідження імітаційної моделі об'єкта у MATLAB/Simulink	17
2.4 Побудова приведеної передатної функції об'єкта автоматизації та визначення її параметрів	19
2.5 Вибір алгоритму керування об'єктом	19
2.5.1 Визначення алгоритму керування за співвідношенням між часом запізнення та сталою часу об'єкта керування	19
2.5.2 Застосування нейронних мереж для аналізу субстратів.....	19
2.5.3 Результати порівняльного аналізу моделей	21
РОЗДІЛ 4	47
ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	48
4.1 Формування перехідного процесу засобами імітаційного моделювання та аналіз його характеристик	48
4.2 Коригування параметрів системи керування	50

4.2.1 Дослідження стійкості за логарифмічними частотними характеристиками	50
РОЗДІЛ 5	51
СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	52
5.1 Розробка і опис схеми з'єднань.....	52
5.1.1 Розробка схеми електричної принципової	52
5.2 Розробка і опис схеми підключень. Вибір щитової продукції.....	52
5.2.1 Структурна схема системи автоматизації	52
5.2.2 Вибір щита керування	53
РОЗДІЛ 6	53
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА WEB-СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЯКОСТІ СУБСТРАТІВ	54
6.1 Загальна характеристика розробленої системи	54
6.2 Вхідні параметри системи.....	54
6.3 Вихідні параметри системи.....	56
6.4 Ансамблева ML-модель та алгоритм прогнозування.....	57
6.5 Інтерфейс оператора та навігація	58
6.6 Автономний режим роботи системи.....	58
6.7 Технічні характеристики системи	59
РОЗДІЛ 7	59
РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ САК. 59	
7.1 Капітальні витрати	59
7.2 Річні експлуатаційні витрати та економічний ефект	60
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку світової енергетики дедалі більше орієнтовані на скорочення використання викопних енергоносіїв та впровадження відновлюваних джерел енергії. Одночасно із цим загострюється проблема утилізації органічних відходів аграрного та харчового виробництва. Одним із найбільш ефективних шляхів комплексного вирішення зазначених проблем є використання біогазових технологій, які забезпечують переробку органічної сировини з одночасним отриманням теплової й електричної енергії.

Попри значні переваги біогазових установок, їх ефективна експлуатація значною мірою залежить від стабільності характеристик вхідного субстрату. На практиці склад сировини постійно змінюється, що ускладнює підтримання оптимального режиму анаеробного зброджування. У більшості існуючих вітчизняних БГУ оцінювання параметрів субстрату здійснюється переважно шляхом періодичних лабораторних досліджень, що не дозволяє оперативно реагувати на зміну технологічних умов.

У результаті порушення стабільності процесу можуть виникати зниження виходу біогазу, пригнічення активності метаногенних мікроорганізмів та порушення режиму ферментації. Саме тому особливо актуальним є впровадження автоматизованих систем контролю, здатних прогнозувати поведінку субстрату ще до його надходження до ферментера.

В основу даної роботи покладено підхід, що поєднує класичні методи автоматичного керування із сучасними алгоритмами машинного навчання. Така інтеграція дозволяє реалізувати систему інтелектуального аналізу якості сировини в реальному масштабі часу без необхідності постійного лабораторного контролю. Практична реалізація запропонованого підходу виконана для біогазової установки електричною потужністю 500 кВт.

Мета роботи – розробка комплексної автоматизованої системи керування біогазовою установкою з інтегрованим модулем інтелектуального аналізу якості субстратів на основі ансамблевих алгоритмів машинного навчання.

Об'єкт дослідження – процес анаеробного зброджування органічних субстратів у біогазовому реакторі.

Предмет дослідження – методи автоматизованого керування та інтелектуального прогнозування характеристик субстрату.

Для реалізації поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

1. провести аналіз біогазової установки як технологічного об'єкта керування та розробити функціональну схему автоматизації;
2. сформулювати математичну модель теплового процесу ферментера та отримати передатну функцію об'єкта;
3. виконати синтез ПД-регулятора аналітичним методом та перевірити його параметри у MATLAB/Simulink;
4. створити інтелектуальний модуль прогнозування виходу біогазу на основі ансамблю моделей машинного навчання;
5. обґрунтувати вибір засобів автоматизації та розробити SCADA-систему на платформі Zenon;
6. виконати економічну оцінку ефективності впровадження системи та розробити заходи з охорони праці.

Методи дослідження – методи системного аналізу, параметричного аналізу ТОК, метод ступінчастого збурення для ідентифікації об'єкта, аналітичний метод компенсації полюсів при синтезі регулятора, алгоритми машинного навчання (Random Forest, XGBoost, MLP), а також імітаційне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink.

Вихідні дані для розробки теми – Установка потужністю 500 кВт, два ферментери об'ємом 870 м³, технологічні норми:
 $T_{\phi} = 37^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 6.8 \div 7.4$, $\text{CH}_4 \geq 60\%$.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Сучасний стан розвитку біогазової галузі

Біогазова енергетика є одним з найбільш динамічно зростаючих секторів відновлюваної енергетики у світі. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), глобальне виробництво біогазу та біометану в останнє десятиліття демонструє стійке зростання. Країни ЄС, особливо Німеччина, Данія та Нідерланди, досягли значного прогресу в розвитку біогазових технологій та впровадженні інтелектуальних систем управління.

Україна має значний потенціал для розвитку біогазової галузі, що обумовлено розвиненим аграрним сектором і великим обсягом органічних відходів. За оцінками експертів, технічний потенціал виробництва біогазу в Україні становить понад 7 млрд м³ на рік. Проте реальний рівень використання цього потенціалу залишається значно нижчим через недостатній рівень автоматизації, відсутність ефективних систем моніторингу та управління якістю сировини.

Ключовою проблемою при експлуатації біогазових установок є нестабільність якості вхідної сировини. Залежно від сезону, типу господарства та технологічних особливостей, параметри субстратів можуть суттєво варіюватися. Це призводить до неоптимальних режимів роботи, зниження виходу біогазу та збільшення операційних витрат. Традиційні методи контролю якості, що базуються на ручному відборі проб та лабораторному аналізі, не забезпечують необхідної оперативності та точності.

Розвиток технологій машинного навчання та штучного інтелекту відкриває принципово нові можливості для вирішення цієї проблеми. Інтелектуальні системи здатні аналізувати великі масиви даних в режимі

реального часу, виявляти аномалії, класифікувати типи субстратів та прогнозувати ефективність зброджування ще до завантаження сировини в реактор.

1.2 Фізико-хімічні параметри субстратів та їх вплив на якість біогазу

Якість субстратів для анаеробного зброджування визначається сукупністю фізико-хімічних параметрів, кожен з яких відіграє певну роль у формуванні умов для мікробіологічної активності. Розуміння взаємозв'язку між цими параметрами та виходом біогазу є основою для побудови ефективних моделей прогнозування.

1.2.1 Основні параметри якості субстратів

Загальний вміст сухих речовин (TS, Total Solids) характеризує масову частку нерозчинного залишку після висушування субстрату. Для ефективного анаеробного зброджування оптимальний вміст TS зазвичай становить 8–12% для рідинних субстратів та до 30–35% для твердих субстратів. При концентрації TS понад 35% може знижуватися ефективність перемішування та масообміну в реакторі.

Леткі речовини (VS, Volatile Solids) відображають вміст органічної речовини у субстраті, яка підлягає біологічному розкладу. Зазвичай виражаються у відсотках від TS. Висока частка VS (70–85% від TS) свідчить про високий біогазовий потенціал субстрату. Відношення VS/TS є важливим показником при оцінці придатності субстрату для зброджування.

Хімічне споживання кисню (COD, Chemical Oxygen Demand) є загальним показником вмісту органічних речовин у рідкій фракції субстрату. Визначається кількістю кисню, необхідного для хімічного окислення всієї органічної речовини. Для анаеробного зброджування застосовують розчинну (sCOD) та загальну (tCOD) фракції COD.

Показник рН характеризує кислотно-лужний баланс середовища, який критично важливий для підтримки активності мікробних угруповань. Метаногенні мікроорганізми є найбільш чутливими до значень рН і демонструють оптимальну активність у діапазоні 6.8–7.4. Значення рН нижче 6.5 або вище 8.0 призводить до інгібування метаногенезу.

Відношення вуглецю до азоту (C/N) є важливим показником збалансованості живильного середовища. Оптимальне значення C/N для анаеробного зброджування знаходиться в діапазоні 20–30. При низькому відношенні C/N відбувається надмірне накопичення аміаку, що пригнічує метаногенні бактерії. При надто високому C/N зменшується доступний азот для клітинного синтезу.

Леткі жирні кислоти (VFA, Volatile Fatty Acids) є проміжними продуктами анаеробного зброджування і включають оцтову, пропіонову, масляну та ізомасляну кислоти. Накопичення VFA понад 2000–3000 мг/л є індикатором порушення балансу в реакторі та потенційного інгібування процесу.

Таблиця 1.1. Оптимальні діапазони параметрів якості субстратів для анаеробного зброджування

Параметр	Позначення	Оптимальний діапазон	Одиниці
Загальні сухі речовини	TS	8–35	%
Леткі речовини	VS	70–85 від TS	%
Хімічне споживання кисню	COD	20–80	г/л
Показник кислотності	pH	6.8–7.4	–

Відношення вуглецю до азоту	C/N	20–30	–
Леткі жирні кислоти	VFA	200–2000	мг/л
Загальний аміакний азот	TAN	< 3000	мг/л
Температура	T	35–37 (мезофіл)	°C

1.2.2 Вплив субстратного складу на вихід біогазу

Теоретичний вихід біогазу з одиниці маси субстрату визначається його хімічним складом. Жири мають найвищий питомий вихід біогазу (до 1000 Нл/кг VS) з високим вмістом метану (70–72%). Вуглеводи та білки мають нижчий потенціал (400–500 Нл/кг VS), але забезпечують стабільніший перебіг процесу. Змішані субстрати, що поєднують різні типи органічних матеріалів, як правило, демонструють синергетичний ефект при сумісному зброджуванні (ко-дигестія).

Дослідження показують, що комбінування різних субстратів дозволяє оптимізувати C/N відношення, збалансувати живильне середовище та підвищити буферну ємність системи. Прикладом ефективної ко-дигестії є суміш гною великої рогатої худоби (стабілізуючий субстрат) з харчовими відходами або рослинними силосами (активні субстрати з високим вмістом легкодоступної органіки).

1.3 Огляд методів інтелектуального аналізу у біогазовій галузі

1.3.1 Нейронні мережі для прогнозування виходу біогазу

Застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) для моделювання процесу анаеробного зброджування активно досліджується протягом останніх двох десятиліть. Перші роботи в цій галузі були зосереджені на прогнозуванні загального виходу біогазу за фізико-хімічними параметрами субстрату.

Багатошаровий перцептрон (MLP) є найбільш поширеною архітектурою для задач регресії в цій галузі. Дослідження показують, що MLP з двома прихованими шарами та функцією активації ReLU або tanh демонструє задовільну точність прогнозування при RMSE 5–15% та $R^2 > 0.85$ для більшості типів субстратів.

Рекурентні нейронні мережі (RNN) та LSTM-мережі застосовуються для врахування часової динаміки процесу зброджування. Ці архітектури здатні виявляти часові залежності між послідовними вимірами параметрів, що особливо важливо для прогнозування ефективності зброджування в умовах мінливої якості субстрату.

1.3.2 Ансамблеві методи

Алгоритм Random Forest (RF) демонструє високу ефективність у задачах класифікації субстратів та оцінки важливості вхідних параметрів. Завдяки механізму усереднення результатів великої кількості дерев рішень, RF забезпечує стійкість до перенавчання та шумових даних. Важливою перевагою є можливість оцінки важливості ознак (feature importance), що дозволяє ідентифікувати найбільш інформативні параметри субстрату.

Алгоритм XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) є ефективним методом підвищення точності прогнозування за рахунок послідовного навчання ансамблю дерев рішень з корекцією похибок. XGBoost часто демонструє кращі результати порівняно з MLP на структурованих табличних даних і вимагає менших обчислювальних ресурсів.

1.3.3 Методи виявлення аномалій у параметрах субстратів

Виявлення аномальних значень у потоці даних вхідного контролю є важливим компонентом інтелектуальної системи. Методи, що

застосовуються: статистичні (z-score, IQR), ізоляційний ліс (Isolation Forest), автоенкодери на основі нейронних мереж. Кожен з підходів має переваги залежно від природи аномалій та обсягу доступних даних.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Математична модель об'єкта за результатами теоретичних досліджень

Математичну модель теплового процесу ферментера сформовано на основі рівняння теплового балансу (рис. 2.1). Під час побудови моделі враховано тепловий потік від теплоносія Q_{heat} , теплоту біохімічних реакцій Q_{bio} , теплові втрати через поверхню реактора Q_{exp} , а також теплові потоки, пов'язані з подачею та відведенням субстрату.

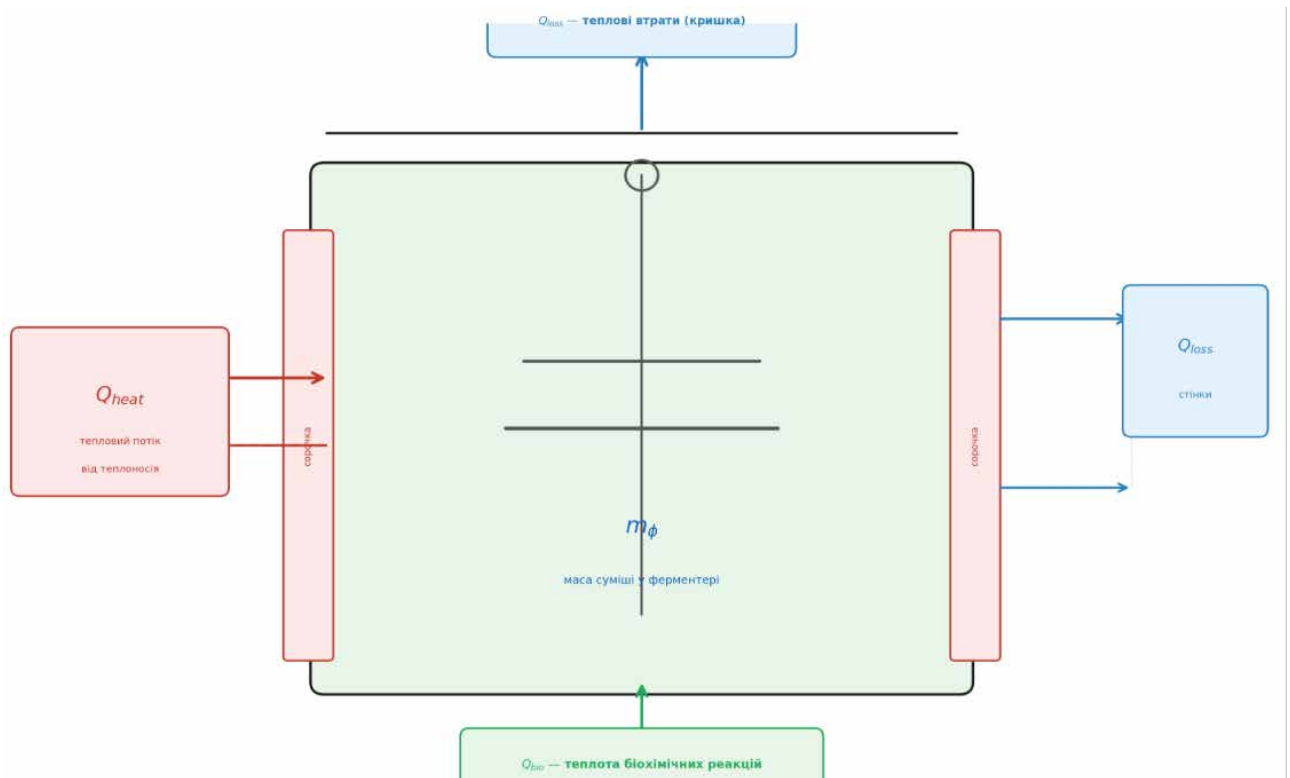


Рис. 2.1 – Теплова схема ферментера: Q_{heat} – тепловий потік від теплоносія; Q_{exp} – теплові втрати; Q_{bio} – теплота біохімічних реакцій; m_{ϕ} – маса суміші у ферментері

Рівняння теплового балансу має вигляд:

$$m_{\phi} \cdot C_p \cdot d \frac{T_{\phi}}{t} = Q_{heat} + Q_{bio} - Q_{втр} - m_{вх} \cdot C_p \cdot T_{\phi} + m_{ex} \cdot C_p \cdot T_{ex}, \quad (2.1)$$

де: $m_{\phi} = 1740$ кг – маса реакційної суміші у ферментері;

$$C_p = 4200 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$$

питома теплоємність; коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія

$$k_h = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{м}^3;$$

$$k_{втр} = 0.8 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})} -$$

коефіцієнт теплових втрат при площі поверхні $F_{\phi} = 350 \text{ м}^2$.

Після лінеаризації рівняння (2.1) відносно робочої точки отримано модель першого порядку із запізненням. Розраховані параметри мають

$$T_{об} = \frac{m_{\phi} \cdot C_p}{k_h \cdot G_{heat}^0 + k_{втр} \cdot F_{\phi}} = \frac{7\,308\,000}{1\,240} \approx 340 \text{ хв}$$

$$K_{об} = \frac{k_h \cdot (T_{тн} - T_{\phi}^0)}{k_h \cdot G_{heat}^0 + k_{втр} \cdot F_{\phi}} \approx 46,0 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{год} / \text{м}^3$$

значення:

2.2 Математична модель об'єкта за результатами експериментальних досліджень

2.2.1 Активний експеримент для моделювання

Для перевірки адекватності теоретичної моделі проведено активний експеримент методом ступінчастого збурення [6].

Після виведення установки на сталий режим при температурі $T_{\phi} = 37^\circ\text{C}$ виконано ступінчасту зміну витрати теплоносія на $\Delta G_{heat} = 0.2 \text{ м}^3/\text{год}$ та зареєстровано реакцію системи.

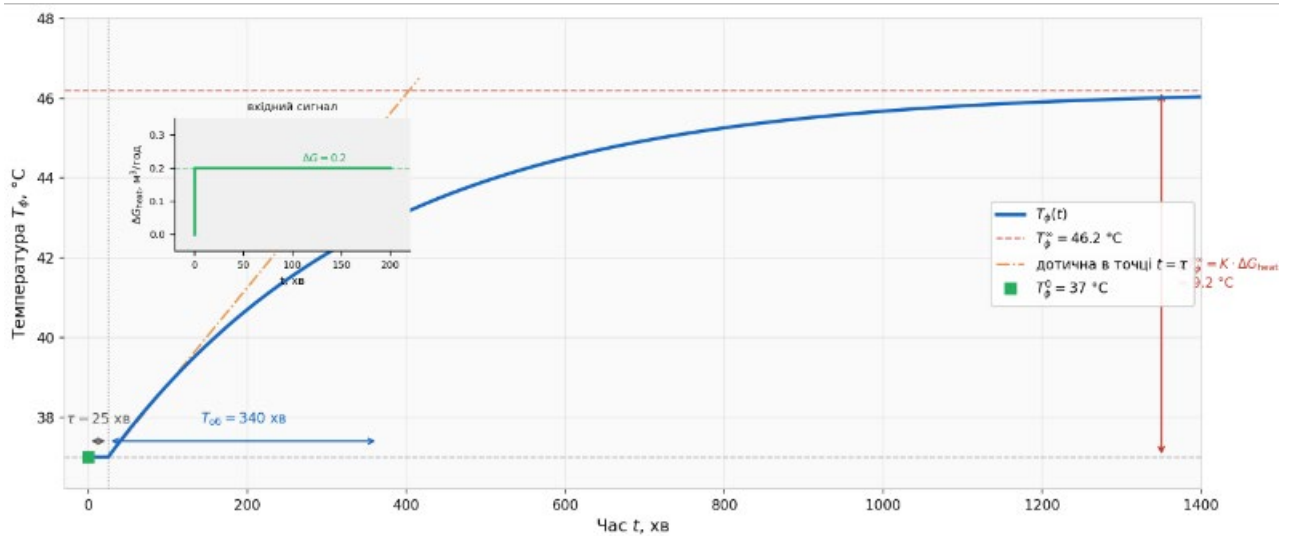


Рис. 2.2. Перехідна характеристика об'єкта (ферментер) за каналом $G_{heat} \rightarrow T_{\phi}$,

отримана при активному експерименті. За результатами обробки перехідної характеристики методом дотичної отримано:

$$T_{06} = 340 \text{ хв},$$

$$\tau = 25 \text{ хв},$$

$$K_{об} = 46 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{год} / \text{м}^3$$

Похибка між експериментальними та теоретичними параметрами не перевищує 4.7%, що свідчить про достатню адекватність прийнятої математичної моделі.

2.3 Розробка та дослідження імітаційної моделі об'єкта у MATLAB/Simulink

Для додаткової перевірки параметрів об'єкта створено імітаційну модель у MATLAB/Simulink (рис. 2.3). Структура моделі включає блоки Step,

$$W = \frac{46}{340s+1} \quad \text{із виведенням}$$

результатів через Scope.

Моделювання виконано командою:

Рис. 2.3 – Структурна схема імітаційної моделі об'єкта у MATLAB/Simulink

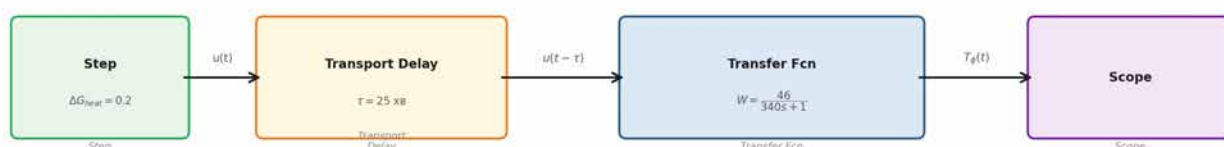


Рис. 2.3. Структурна схема імітаційної моделі об'єкта у MATLAB/Simulink



Рис. 2.4. Результат моделювання перехідної характеристики об'єкта в MATLAB ($\Delta G_{\text{heat}} = 0.2 \text{ м}^3/\text{год}$)

Під час моделювання отримали наступні результати:

$$\Delta T_{\phi} = 9.2^{\circ}\text{C},$$

$$K_{\phi\phi} = 46.0$$

Отримані результати підтвердили відповідність перехідного процесу аперіодичній ланці першого порядку із транспортним запізненням.

2.4 Побудова приведеної передатної функції об'єкта автоматизації та визначення її параметрів

Передатна функція ферментера за каналом « $G_{heat} \rightarrow T_{\phi}$ » записується у вигляді аперіодичної ланки першого порядку із транспортним запізненням:

$$W_{обр} = 46 / (340 p + 1) * e^{(-25 p)}$$

Відношення часу запізнення до сталої часу становить:

$$\frac{\tau}{T_{\phi\phi}} = \frac{25}{340} = 0.074 < 0.2$$

Оскільки отримане значення значно менше 0.2, об'єкт характеризується достатньою керованістю для застосування класичного ПД-регулятора .

2.5 Вибір алгоритму керування об'єктом

2.5.1 Визначення алгоритму керування за співвідношенням між часом запізнення та сталою часу об'єкта керування

З урахуванням співвідношення $\frac{\tau}{T_{\phi\phi}} = 0.074 < 0.2$ для даного об'єкта обрано ПД-алгоритм керування. Такий тип регулятора забезпечує якісне відпрацювання як керуючих дій, так і зовнішніх збурень.

2.5.2 Застосування нейронних мереж для аналізу субстратів

Поряд із задачею температурного регулювання вирішувалась задача прогнозування виходу біогазу залежно від параметрів субстрату.

Вхідний вектор $X = \{TS, VS, COD, pH, C/N, VFA, T, HRT\}$ містить вісім основних характеристик, а вихідним параметром Y є питомий вихід біогазу.

Для реалізації прогнозування використано багатошаровий перцептрон (MLP) із трьома прихованими шарами та функцією активації ReLU. Навчання мережі проводилось методом trainscg протягом 500 епох із розподілом вибірки 70/15/15%.

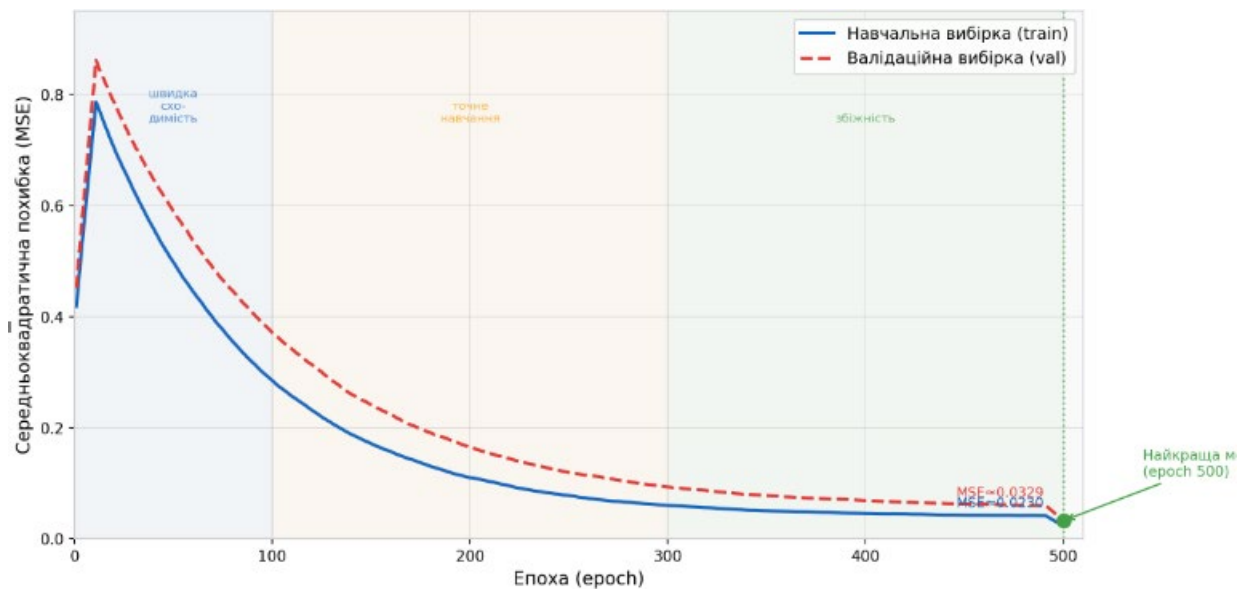


Рис. 2.5. Зміна помилки навчання MLP в процесі ітерацій (крива навчання та валідації)

- Синя лінія — похибка на навчальній вибірці (train MSE), швидко спадає
- Червона пунктирна — похибка на валідаційній вибірці (val MSE), спадає повільніше
- Зелена крапка — найкраща модель (мінімальна валідаційна похибка)
- Три фазові зони: швидка збіжність → точне навчання → стабілізація

- Фінальні значення MSE підписані на графіку

2.5.3 Результати порівняльного аналізу моделей

Для підвищення точності прогнозування застосовано ансамбль моделей Random Forest, XGBoost та MLP. Комбінування прогнозів дозволило суттєво зменшити дисперсію похибки порівняно з окремими моделями.

Результати тестування на незалежній вибірці ($n = 127$) показали високу точність ансамблевого підходу (наведено в таблиці 2.2).

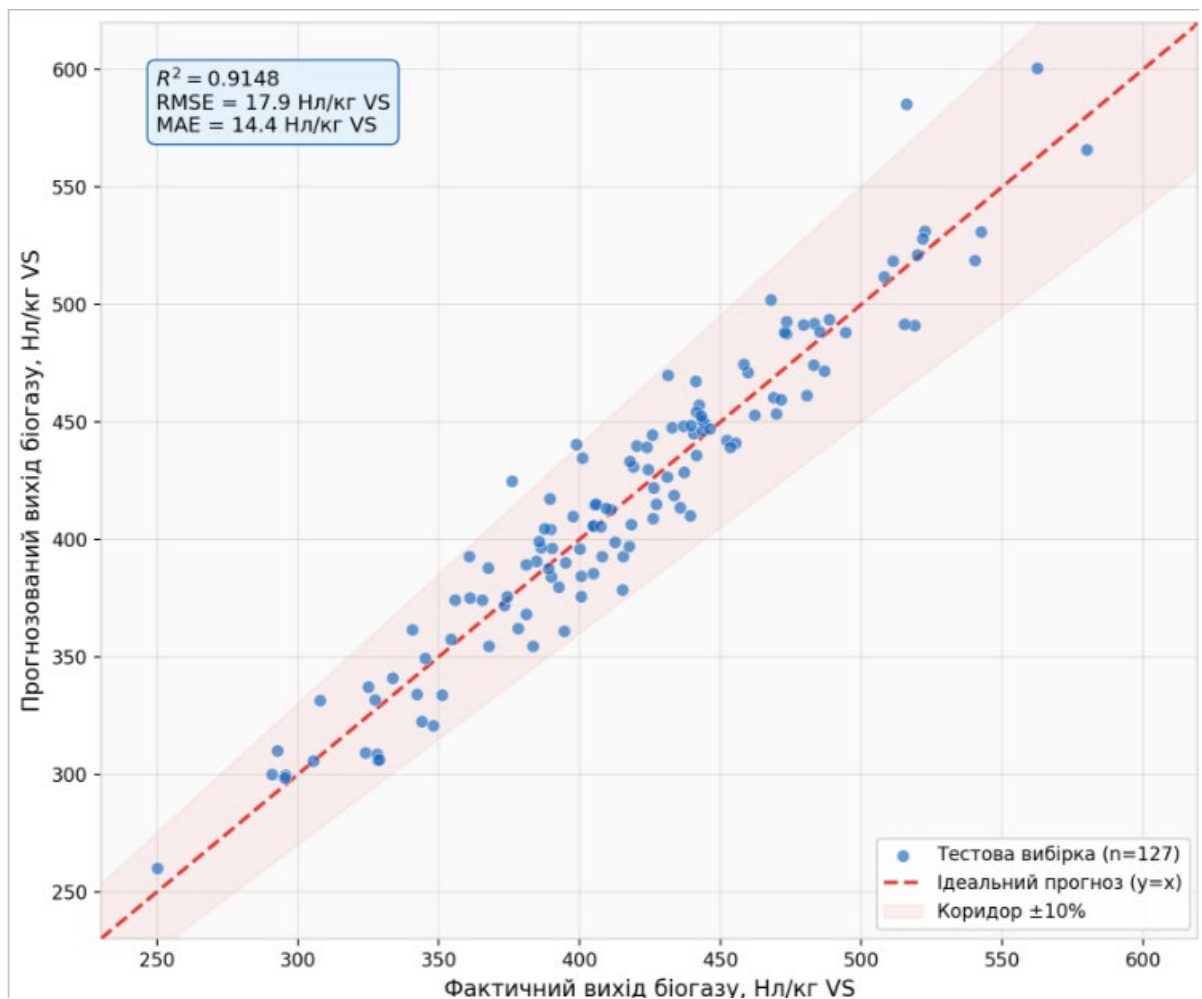
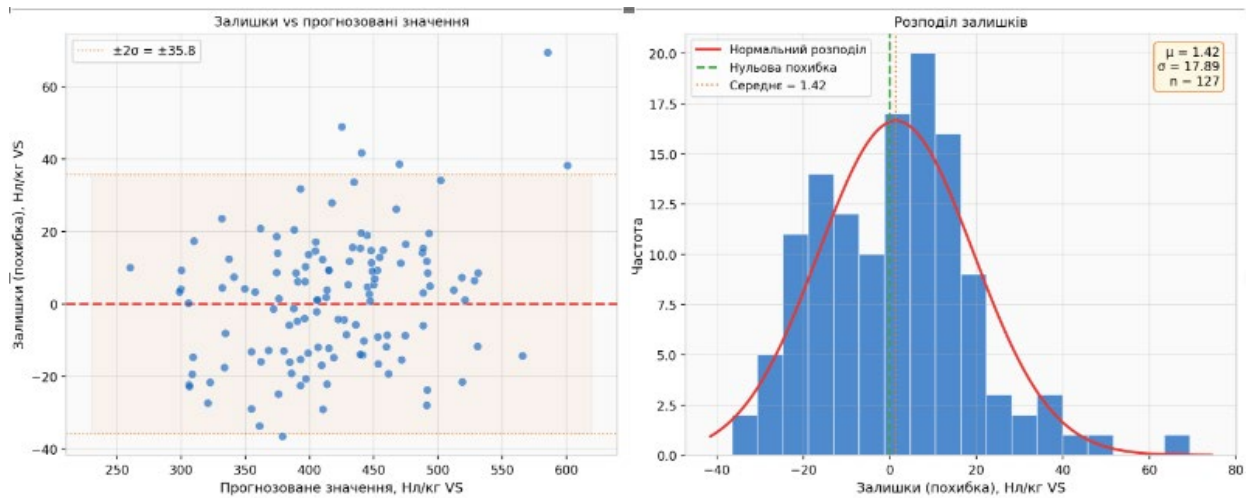


Рис. 2.6. Порівняння фактичних та прогнозованих значень виходу біогазу

- Точки — тестова вибірка ($n=127$)
- Червона пунктирна — ідеальний прогноз ($y=x$)
- Коридор $\pm 10\%$



- Блок з R^2 , RMSE, MAE

Рис. 2.7. Графіки розподілу залишків та прогнозів значень

Зліва: залишки vs прогнозовані значення з коридором $\pm 2\sigma$

Справа: гістограма залишків з кривою нормального розподілу, μ і σ

Таблиця 2.2 Порівняльний аналіз точності регресійних моделей (тестова вибірка, n = 127)

Модель	R^2	RMSE, Нл/кг VS	MAE, Нл/кг VS	MAPE, %	Час навчання, с
Random Forest	0.8743	22.4	16.8	4.12	18.3
XGBoost	0.8891	21.1	15.9	3.87	12.7
MLP (нейромережа)	0.8612	24.0	18.2	4.51	94.6
Ансамбль (RF+XGB+MLP)	0.9134	18.7	13.4	3.21	125.6

* Виділено зеленим — найкраща модель (найвища точність), синім жирним — найкраще значення серед окремих моделей.

Зелений фон — ансамблева модель

Синій жирний — найкраще значення серед окремих моделей

РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

3.1. Функціональна схема автоматизації системи керування температурним режимом виробництва біогазу

Біогазові установки - це комплекси з утилізації різних видів відходів, зокрема сільськогосподарських, промислових і повсякденних, які не тільки очищають території від забруднень, а й виробляють електроенергію, тепло та добрива високого рівня.

Біогазові установки мають три способи переробки органічних речовин, кожен з яких має свої плюси та мінуси.

У психрофільному режимі, коли доцільна температура в середині метаннику становить 15-20°C, очищення відходів може бути досягнуто протягом 30-40 днів. Цей метод зазвичай використовується в літні місяці, коли об'єм субстрату значно менший за звичайний, наприклад, через випасання худоби.

Мезофільний режим - це режим переробки відходів при температурі 30-40 °C, при якому відходи переробляються за 7-15 днів, залежно від їх виду. Однією з переваг такого режиму є те, що ефективність газу майже не зменшується при незначних відхиленнях температури від оптимальної, і для підтримки температури потрібно менше енергії. Однак, недоліки полягають у менш ефективному виділенні газу та тому, що біошлам, одержаний за такого режиму, не є повністю чистий.

Термофільний режим потребує температури 52-56°C і надійно переробляє органічні відходи за 5-10 днів, але рівень якості газу та добрив переважно нижча, чим у мезофільному режимі. Нагрівання в термофільному режимі також зазвичай потребує більше енергії. Цей режим

найбільш підходить, коли основною метою є переробка дуже великої чисельності відходів.

Вимоги до температури субстрату для ефективного виробництва газу стають жорсткішими з підвищенням температури ферментації: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ на годину в мезофільному режимі, $\pm 2^{\circ}\text{C}$ на годину в психофільному режимі і $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ на годину в термофільному режимі. Відокремлюють два типи устаткування, перший це періодичної, другий безперервної дії. Для мого проекту я обрав БГУ безперервної дії з одним із режимів, а саме - мезофільним. В фундамент конструкції закладено ціль формування біогазового реактора, в якому завдяки введення нових складових і зв'язків здобуваємо зростання продуктивності біогазового реактора і заощадження часу при виробленні біогазу (рис. 3.1).

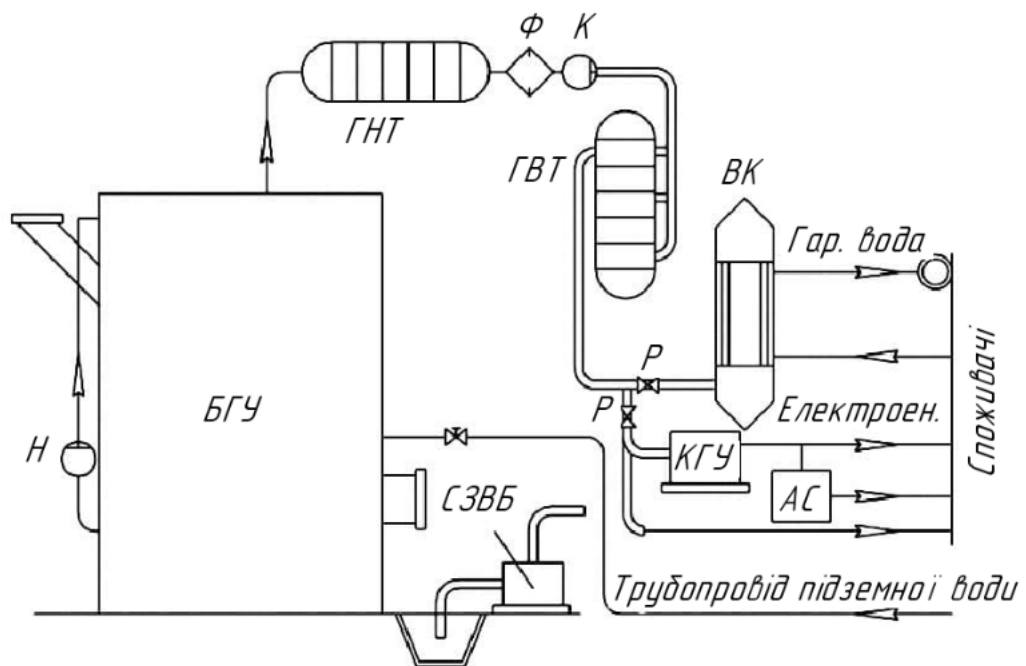


Рис. 3.1. Схема установки когенерації зі системою накопичення енергії:

БГУ – біогазова установка; ГНТ – газгольдер низького тиску; ГВТ – газгольдер високого тиску; Ф – фільтр; К – компресор; Н – насос; СЗВБ –

система завантаження/розвантаження біомаси; ВК – водогрійний котел; КГУ – когенераційна установка; Р – регулятор тиску; АС – акумулююча система

Процес роботи біогазової установки включає в себе подачу органічної біомаси в установку і переробку її в біогаз за підтримки водяної бані. Для цього процесу використовується нагріта вода з водогрійного котла. Потім біогаз надходить до фільтру і під'єднується до ГНТ і ГВТ, після чого прямує в когенераційну установку, де формується тепло та електроенергія.

Електроенергія зберігається в накопичувальній системі, а тепло й електрика постачаються споживачеві. Установка демонструє досить велику економічну ефективність та швидкий термін окупності.

Установка має вбудовану систему керування та контролювання і робить повністю автоматично. Для забезпечення оптимальної температури близько 30 % біогазу використовується в метантенку. Процес ферментації зазвичай триває від 6 до 12 днів. Тепло, що виробляється дизельним генератором, споживається енерготехнологічною установкою ферми.

Система автоматичного контролювання температурою субстрату в біореакторі дає точний контроль біосубстрату за заданої температури (15-60°C). Це поліпшує процес ферментації та збільшує кількість виробництва газу. Для досягнення такого результату використовується регулювання об'єму вною змінною, якою керують в цьому об'єкті. нагрітої води в теплообміннику.

Основним збурювальним впливом на керований об'єкт, що спричиняє перемену температури біомаси в реакторі за постійного значення керувального впливу $f_{кр} = \text{const}$ є атмосферний стан $f(t)$ (температура навколишнього середовища).

В середині біореактору $\Theta(t)$ температура біомаси є осно

Таким чином, схема для керування температурою в біореакторі матиме наступний вигляд (рис. 3.2):

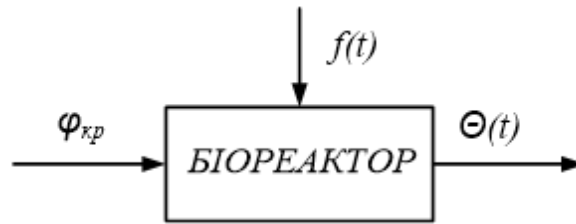


Рис. 3.2. Інформаційна схема біореактора

Головною метою системи автоматичного керування (рис. 3.3) є забезпечення сталої температури біомаси $\Theta(t)$ в біореакторі, згідно з встановленим значенням.

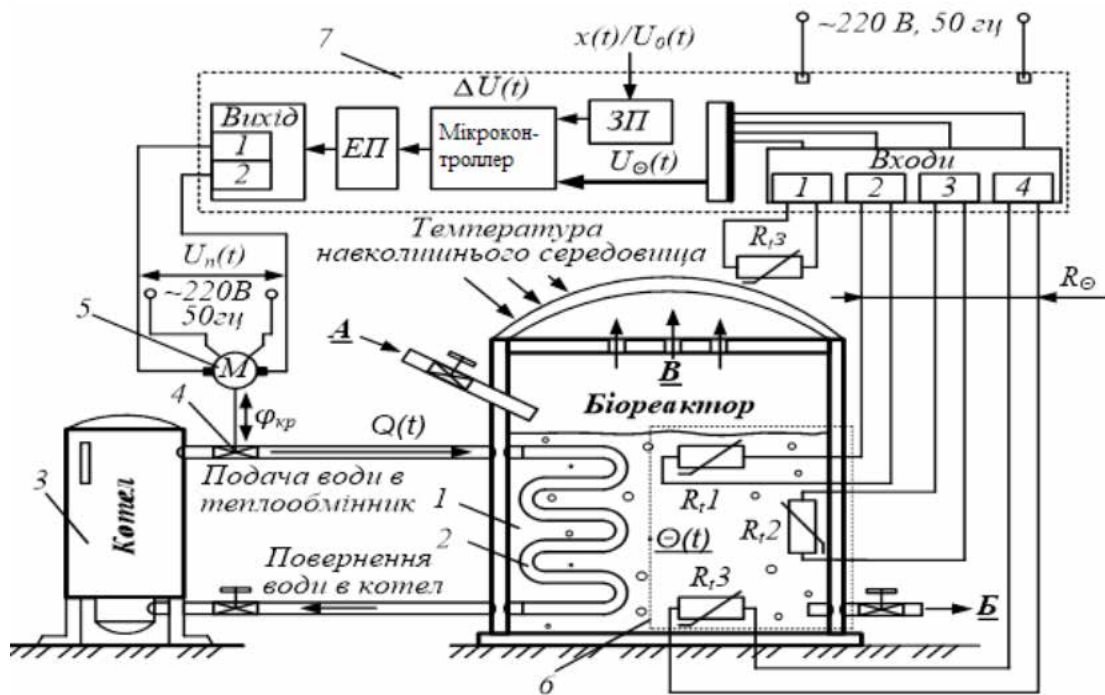


Рис. 3.3. Функціональна схема автоматизації керування температурою субстрату в модульній установці біогазу:

1 – біомаса; 2 – теплообмінник; 3 – водогрійний котел; 4 – регулюючий клапан; 5 – електродвигун регулюючого клапана; 6 – комплект терморезисторів; 7 – автоматичний керуючий пристрій (АКП); А –

завантаження субстрату в реактор; Б – вивантаження перебродженої біомаси, в сховища для біодобрих; В – вихід біогазу

Об'єктом керування (ОК) в системі автоматичного керування (САК) є модульний біореактор (ферментатор). Регульованою величиною ОК, і вихідним параметром системи є температура біомаси $\Theta(t)$ в біореакторі. Стабілізація дійсного значення температури $\Theta(t)$ відповідно до заданого $\Theta_0(t)$ здійснюється САК шляхом подачі гарячої води у теплообмінник 2, який знаходиться на стінках ферментатора. Кількість подачі гарячої води $Q(t)$ регулюється клапаном 4 з електроприводом, який приводиться в дію електродвигуном 5. Таким чином, клапан 4 є регулюючим органом (РО), а електродвигун 5 – виконавчим механізмом (ВМ). Функціональна схема автоматизації системи керування температурним режимом виробництва біогазу зображена на рис.

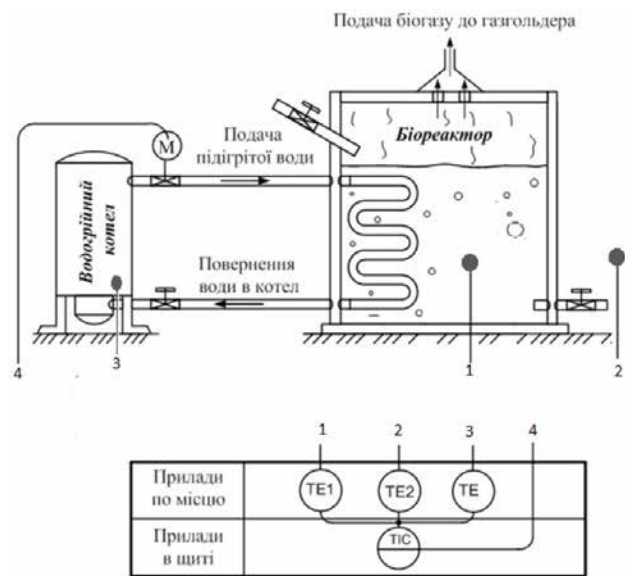


Рис. 3.4. Функціональна схема автоматизації системи керування температурним режимом виробництва біогазу

3.2. Вибір первинного перетворювача

До датчиків як правило, ставлять наступні вимоги:

- лінійність і однозначність статичної характеристики (допустима не лінійність не повинна перевищувати 0,1...3 %);
- високу чутливість;
- стабільність характеристик у часі;
- швидкодія;
- стійкість до хімічних впливів контролюючого і навколишнього середовища (первинні перетворювачі, розміщені у захисній оболонці);
- мінімальний зворотній вплив на контролюючий параметр;
- зручність монтажу і обслуговування.

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

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

Датчик рекомендується підбирати таким чином, щоб межі його вимірювання охоплювали діапазон зміни контрольованої ним величини X і були як найближчими до них, не забуваючи про необхідність забезпечення необхідної перевантажувальної здатності датчика і про можливість його підключення до обраного електронного пристрою управління регулятора. При цьому особливу увагу необхідно приділяти швидкодії, чи інерційності вимірювального перетворювача, яка характеризується його постійною часу T .

Так, при обґрунтуванні вибору датчика температури для регулятора температури повітря в телятнику необхідно в першу чергу звернути увагу на те, який діапазон зміни температури повітря відповідно до технічних умов повинна забезпечити спроектована система регулювання.

Діапазон регулювання температури субстрату в біогазовій установці складає (30...55)°С. Для цього діапазону можна вибрати межі вимірювання мідного термометра опору ТСМ 50 (див. таблицю 2.3), які складають (-50...150)°С. Інерційність цього перетворювача складає 15 с. Для того, щоб цей перетворювач у процесі вимірювання температури повітря на заданому рівні не вносив недопустиму динамічну похибку вимірювання температури, його постійна часу ТСЕ повинна бути не менше, ніж на порядок меншою від постійної часу об'єкта ТОУ. Постійна часу біогазової установки ТОУ, складає 320с. З огляду на сказане вище, максимальна постійна часу вимірювального перетворювача, при якій можна знехтувати його інерційністю, повинна бути не більше $ТОУ/10 = 32$ с, а постійна часу вибраного датчика температури ТСМ 50 рівна 15 с.

Вибраний нами датчик температури ТСМ 50 має наступний зовнішній вигляд – рис. 3.5. і статичну характеристику – рис. 3.6.

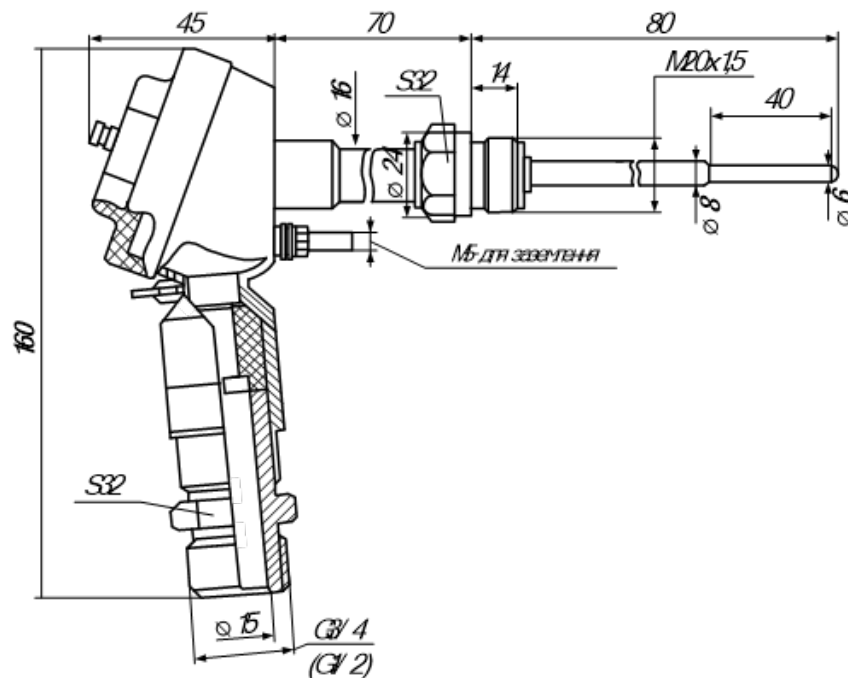


Рис. 3.5. Загальний вигляд датчика ТСМ 50

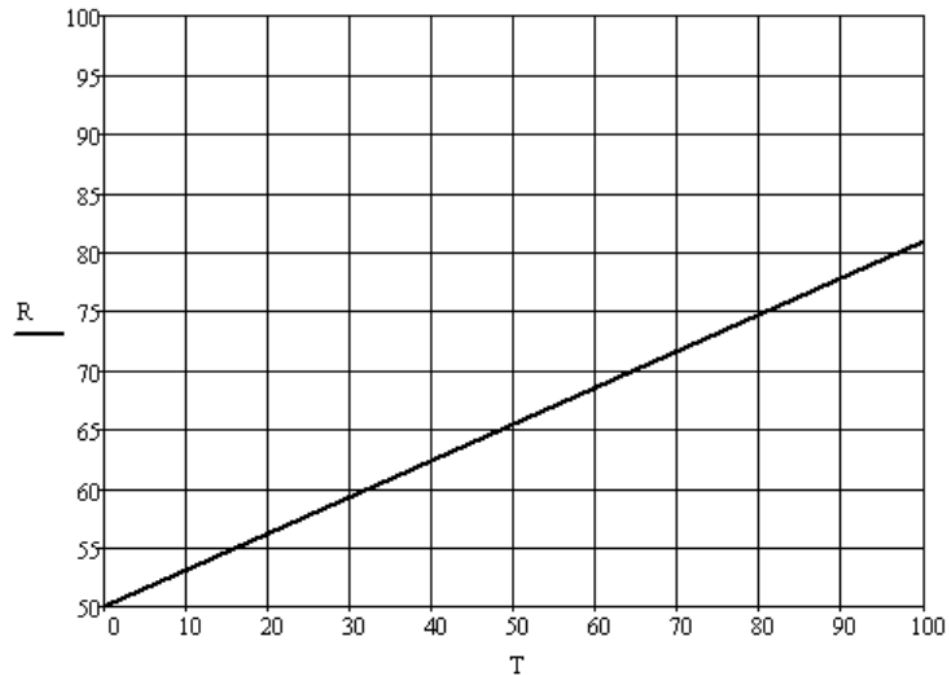


Рис. 3.6. Статична характеристика датчика ТСМ 50

Таблиця 3.1. Характеристика датчика температури ТСМ 50

Тип	Градуювання	Діапазон вимірювання 0С	Показник теплової інерції
ТСМ 50	24 гр.(R0 = 50 Ом)	-50...+150	15с

За динамічними властивостями термометри опору є інерційними ланками , передаточна функція яких має вигляд:

$$W(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1}$$

Передатну функцію датчика температури типу ТСМ 50 знаходимо наступним чином:

$$m_{\delta} \cdot C_{\delta} \cdot \frac{d \cdot \delta \cdot \Theta_{\delta}}{d \cdot t} = \alpha_{\delta} \cdot F_{\delta} \cdot (\delta \cdot \Theta_{n\delta} - \Theta_{\delta})$$

де: m_{δ} - маса датчика, кг;

C_{δ} - теплоємність датчика, кДж/кг °С;

α_{δ} - коефіцієнт теплопередачі, кДж/кг °С;

F – поверхня теплообміну, м²;

θ_{δ} - температура датчика, °C;

θ_{ns} - температура субстрату, °C.

$$R_{\delta} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \theta_{\delta})$$

де: R_0 - опір датчика при 0°C, Ом;

α - термічний коефіцієнт для міді, приймаємо $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$.

Записавши рівняння (2.3) у відхиленнях одержимо:

$$\Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta \theta_{\delta}$$

Після виконання певних перетворень отримаємо:

$$\frac{m_{\delta} \cdot C_{\delta}}{\alpha_{\delta} \cdot F_{\delta}} \cdot \frac{d\Delta R}{dt} + \Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta \theta_{\delta}$$

В канонічній формі це рівняння має вид:

$$T \cdot \frac{d\Delta R}{dt} + \Delta R = k \cdot \Delta \theta_{\delta}$$

де:

$$T = \frac{m_{\delta} \cdot C_{\delta}}{\alpha_{\delta} \cdot F_{\delta}} \quad k = \alpha \cdot R_0$$

Для датчика ТСМ 50:

$$K = 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 0,21 ;$$

$T = 15$ с – визначили як показник теплової інерції. Тоді передаточна функція має вигляд:

$$W_{\delta}(s) = \frac{0.21}{15 \cdot s + 1}$$

3.3. Вибір та розрахунок параметрів виконавчих механізмів об'єкта керування

Регулюючі клапани є найбільш часто використовуваними елементами, цілеспрямовано впливають на виробничі процеси та керування ними. Клапани є проміжною ланкою між електронними технологіями керування та керованим (робочим) середовищем. Вони, регулюючи параметри робочого середовища, контролюють безперервне протікання виробничого процесу і пов'язують між собою його окремі фази. Інші регулюючі клапани, що використовуються, наприклад в нагрівальній-охолоджувальних контурах, не так суттєво впливають на процес.

Промислові регулюючі клапани, з одного боку, є учасниками цифрового обміну даними про протікання технологічного процесу, а з іншого, - самі здійснюють промисловий процес. За часів цифрових технологій і моделювання засобів керування робочим процесом, регулюючі клапани, з точки зору технологій контролю, недостатньо висвітлені. По суті, ми маємо справу з частиною трубопроводу, що впливає на хід всього технологічного процесу. Перепад тиску в клапані є необхідною умовою здійснення його функції керування і виявляється як втрата енергії в енергетичному балансі виробничого процесу. На рис. 3.7 показано основні деталі сучасного регулюючого клапана. При розробці регулюючого клапана, незалежно від його призначення, необхідно взяти до уваги чотири аспекти:

технічна відповідність регулюючого клапана робочим характеристикам і вимогами,
відповідність вимогам безпеки під час нормальної роботи і в аварійних ситуаціях,
концепція керування процесом, не суперечить принципам роботи приводу,
концепція керування процесом, орієнтована на приведення в дію від сигналу зворотного зв'язку.



Рис. 3.7. Основні частини регулюючого клапана

Регулюючі клапани відіграють ключову роль по відношенню до обох критерій, оскільки вони мають вирішальний вплив на якість виробничого процесу і можливості установки. При оцінці тієї чи іншої моделі регулюючого клапана важливо враховувати вартість його життєвого циклу, вибухозахищеність всієї установки, безпеку людей і навколишнього середовища. Фактори, що впливають на економіку підприємства

У вартість життєвого циклу регулюючого клапана входить не тільки вартість вибору, розробки клапана та інвестицій в нього як таких, але і вартість монтажу і навчання персоналу. Під час експлуатації має додаватися вартість обслуговування, ремонту, запасних частин, можливої заміни клапана і енерговитрат, а так само вартість відшкодування ймовірного збитку навколишньому середовищу. Крім того, необхідно врахувати витрати на очищення та повторне використання. Індивідуальна розробка регулюючих клапанів і конфігурації їх рухомих частин істотно впливає на вартість життєвого циклу.

При цьому скорочуються витрати на експлуатацію та обслуговування. Тим самим, оптимізується економіка всього підприємства.

Регулюючі органи (РО) служать для керування підведенням (відводом) речовини або енергії в об'єкти регулювання з метою зміни регульованого параметра. По роду речовини, що протікає, або енергії РО ділять на пневматичні, гідравлічні й електричні.

При розрахунку регулюючого органу використовують схему яка подана на рис. 3.8.

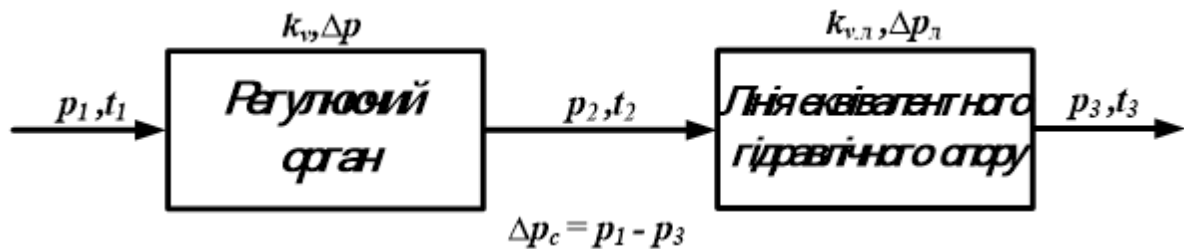


Рис. 3.8. Розрахункова схема при розрахунку регулюючого органу

При розрахунку регулюючого органу необхідно визначити:

- максимальну пропускну здатність $K_{\max}$ регулюючого органу і його умовний діаметр D_y ;
- робочу ділянку витратної характеристики (для клапанів);
- робочу ділянку кривої зміни перепаду тиску для рідини (для пари і газу знаходять тільки максимальний і мінімальний перепад тиску).

Для своєї курсової роботи в ролі регулюючого органу я обрав клапан.

Для визначання максимальної пропускну здатності РО використовуємо формулу

$$KV_{\max} = Q_{\max} 514 \cdot \gamma_n \cdot T_1 \Delta P \cdot P_2$$

де

γ_n – об'ємна маса газу;

$\Delta P = P_1 - P_2$ - перепад тиску на РО;

P_2 – тиск після регулюючого органу;

$Q_{\max}$ – максимальна об'ємна витрата рідини;

T_1 – температура середовища перед регулюючим органом.

Слід відмітити, що якщо регулюють потоки в'язких рідин з індексом в'язкості $Z \leq 1000$, якщо $Z > 1000$ то поправку на густину не вводимо.

При цьому індекс в'язкості обраховуємо за виразом

$$Z = 420 \cdot Q_{\max} \cdot \nu \cdot K V_{\max}$$

Де ν – в'язкість природного газу.

При виборі регулюючого органу у вигляді клапана за наступними параметрами треба перевірити співвідношення

$$K V_{PO} \geq 1.2 K V_{\max}$$

Знаходимо робочу ділянку витратної характеристики вибраного регулюючого органу, тобто хід плунжера. Для цього визначимо пропускну здатність лінії та відношення пропускних здатностей регулюючого органу і лінії:

$$K V_L = Q_{\max} 514 \cdot \gamma_n \cdot T_2 \Delta P_L \cdot P_3$$

$\Delta P_L = P_2 - P_3$ – перепади тиску на лінії;

P_3 – тиск після лінії;

T_2 – температура після РО.

$$n = K V_{PO} / K V$$

де

$K V_{PO}$ – пропускна спроможність клапана

Визначаємо перепад тиску на регулюючому органі формула

$$\Delta P_{PO} = \Delta P_c 1 + n^2$$

$\Delta P_c = P_1 - P_3$ – перепад тисків у системі.

Витрати регулюючого середовища через РО можна обрахувати за виразом

$$Q_{po} = K V_{PO} \cdot \gamma \Delta P_{po}$$

Залежність у робочих умовах відносної витрати μ середовища від ступеня відкриття регулювального органа:

$$\mu_{max} = Q_{max} Q_{po}$$

При виборі регулювального органа в першу чергу необхідно оцінити його витратну характеристику, яка для більшості автоматичних систем повинна бути лінійною й однозначною рис. 3.9.

Ця вимога визначається тим, що тангенс кута нахилу дотичній до витратної характеристики дорівнює коефіцієнту передачі регулювального органа.

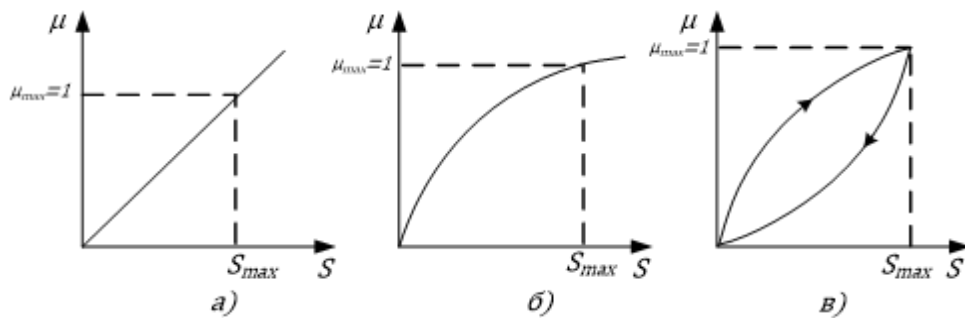


Рис. 3.9. Витратні характеристики регулюючого органу:

а – лінійна (бажана); б – нелінійна; в – нелінійна з гістерезисом

Дані для розрахунку клапана:

Для природного газу об'ємна маса (стандарт AGA8) $\gamma = 4 \text{ кг/см}^3$;

Тиск перед регулюючим органом

$P_1 = 4 \text{ кг/см}^2$;

Тиск після регулюючого органу

$P_2 = 3 \text{ кг/см}^2$;

Тиск після лінії

$P_3 = 2,5 \text{ кг/см}^2$;

Температура перед і після регулюючого органу $t_1 = t_2 = 40^\circ\text{C}$;

Об'ємна витрата рідини $Q_{\max}=100$ м³/год;

Об'ємна витрата рідини $Q_{\min}=50$ м³/год;

В'язкість природного газу (стандарт AGA8)

$\nu = 0,1472$

Розрахунок регулюючого органу (клапана)

1. Максимальна пропускна здатність РО

$$KV_{\max} = \frac{Q_{\max}}{514} \cdot \sqrt{\frac{Y_n \cdot T_1}{\Delta P \cdot P_2}} = \frac{100}{514} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 253}{1 \cdot 3}} = 0,1945 \cdot 183,67 = \mathbf{35,73 \text{ м}^3/\text{год}}$$

де: $\Delta P = P_1 - P_2 = 4 - 3 = 1 \text{ кг/см}^2$; $T_1 = 273 - 40 = 233 \text{ К}$; $Q_{\max} = 100 \text{ м}^3/\text{год}$; $Y_n = 4$

2. Індекс в'язкості Z

$$Z = 420 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\max}}{\nu \cdot KV_{\max}}} = 420 \cdot \sqrt{\frac{100}{0,1472 \cdot 35,73}} = 50186,82 \gg 1000$$

Умова $Z > 1000$ виконана → формула для газового середовища застосовна.

3. Вибір РО та перевірка умов

Обрано клапан: $KV_{\text{РО}} = 60 \text{ м}^3/\text{год}$; $D_y = 50 \text{ мм}$

Перевірка: $KV_{\text{РО}} \geq 1,2 \cdot KV_{\max} \Rightarrow 60 \geq 1,2 \cdot 35,73 = 42,88 \text{ м}^3/\text{год}$ ✓ **умова виконана**

4. Пропускна здатність лінії трубопроводу

$$KV_L = \frac{Q_{\max}}{51,4} \cdot \sqrt{\frac{Y_n \cdot T_2}{\Delta P_L \cdot P_2}} = \frac{100}{51,4} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 253}{0,5 \cdot 2,5}} = 1,945 \cdot 28,45 = \mathbf{55,34 \text{ м}^3/\text{год}}$$

де: $\Delta P_L = P_1 - P_2 = 3 - 2,5 = 0,5 \text{ кг/см}^2$; $T_2 = 233 \text{ К}$; $P_2 = 2,5 \text{ кг/см}^2$

5. Відношення пропускних здатностей РО до лінії

$$n = \frac{KV_{\text{РО}}}{KV_L} = \frac{60}{55,34} = \mathbf{1,084}$$

Коефіцієнт n показує, наскільки клапан перевищує пропускну здатність лінії.

6. Перепад тиску на регулюючому органі

$$\Delta P_{\text{РО}} = \frac{\Delta P_L}{1 + n^2} = \frac{1,5}{1 + 1,084^2} = \frac{1,5}{2,175} = \mathbf{0,689 \text{ кг/см}^2}$$

де: $\Delta P_L = P_1 - P_2 = 4 - 2,5 = 1,5 \text{ кг/см}^2$ (загальний перепад у системі)

7. Витрати через РО при повному відкритті

$$Q_{\text{РО}} = KV_{\text{РО}} \cdot \sqrt{\frac{Y}{\Delta P_{\text{РО}}}} = 60 \cdot \sqrt{\frac{4}{0,689}} = 60 \cdot 2,409 = \mathbf{144,56 \text{ м}^3/\text{год}}$$

Максимальна витрата, яку може пропустити клапан при заданому перепаді тиску.

8. Відносні витрати через РО (ступінь відкриття клапана)

$$\mu_{\max} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{РО}}} = \frac{100}{144,56} = \mathbf{0,691} \text{ (69,1\% — при максимальній витраті)}$$
$$\mu_{\min} = \frac{Q_{\min}}{Q_{\text{РО}}} = \frac{50}{144,56} = \mathbf{0,345} \text{ (34,5\% — при мінімальній витраті)}$$

Зведені результати розрахунку

$KV_{\max}$	=	35,73 м³/год	— Максимально необхідна пропускна здатність
$KV_{\text{РО}}$	=	60 м³/год	— Вибрано клапан (умова $KV_{\text{РО}} \geq 1,2 \cdot KV_{\max}$ виконана)
D_y	=	50 мм	— Умовний діаметр клапана
KV_L	=	55,34 м³/год	— Пропускна здатність лінії
$\Delta P_{\text{РО}}$	=	0,689 кг/см²	— Перепад тиску на клапані
$Q_{\text{РО}}$	=	144,56 м³/год	— Витрата при повному відкритті
$\mu_{\max}$	=	0,691	— Ступінь відкриття при максимальній витраті
$\mu_{\min}$	=	0,345	— Ступінь відкриття при мінімальній витраті

Для даного проекту і розрахунків я обрав клапан фірми «АрмаВент» модель «25ч940иж».

Клапан 25ч940нж рис. 2.10 регулюючий двосідловий фланцевий з двигуном, призначений для використання на центральних і індивідуальних пунктах, котельних системах тепличних хазяйствах і в інших областях народного господарства для автоматичного регулювання технологічних процесів. Удосконалення плунжера в клапані 25ч940нж при наявності двох сідел забезпечує стабільну і надійну роботу при регулюванні потоку середовища. Клапан 25ч940нж має рівнопроцентну характеристику.

Таблиця 3.2. Матеріали основних деталей

Назва деталі	Марка деталі
Корпус, кришка	СЧ20 ДСТУ - 1412
Плунжер, сідло	Сталь 20Х13 ДСТУ - 5632
Ущільнення в затворі	Метал по металу
Ущільнення сальників	Графлекс

Технічні характеристики даного клапана наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Технічні характеристики

Номінальний діаметр, мм	50
Номінальний тиск, МПа	5
Пропускна характеристика	рівнопроцентна
Робочий хід плунжера, мм	28
Умовна пропускна здатність $KV_{max}KV_{max}$, м ³ /годм ³ /год	60

Допустимий перепад тиску, МПа	2,0 0,1
Робоче середовище	вода, пара, природний газ та інші середовища які нейтральні до деталей
Температура робочого середовища	від -15 до +3

$$M_m = 0.75 \cdot \Delta P_{\text{promin}} \cdot D_y^2 \cdot \lambda$$

де

$\Delta P_{\text{ромах}}$ – максимальний перепад тиску на РО;

ΔP_{promin} – мінімальний перепад тиску на РО;

λ – коефіцієнт тертя в опорах РО;

D_y - діаметр РО.

Момент обертання валу виконуючого механізму повинен бути не менший за момент, необхідний для відкриття заслінки. Скористаємося умовою

$$M_n \geq M_{\text{вм}}$$

Розрахунок. Визначаємо реактивний момент

M_p і момент опору в опорах ММ

$$M_p = 0.07 \cdot \Delta P_{\text{ромах}} \cdot D_y^3 = 0.07 \cdot (1.365 \cdot 10^4) \cdot (10 - 3 \cdot 50)^3 = 0,119 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_m = 0.75 \cdot \Delta P_{\text{promin}} \cdot D_y^2 \cdot \lambda = 0.75 \cdot (1,23 \cdot 10^4) \cdot (10 - 3 \cdot 50)^2 \cdot 0.15 = 3,35 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тоді момент виконавчого механізму буде дорівнювати:

$$M_{\text{вм}} = 2(0,119 + 3,35) = 6,97 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Перевіряємо задоволеність електроприводу

$$M_n \geq M_{\text{вм}}$$

$7,2 \geq 6,97$, $7,2 \geq 6,97$ – задовольняє вибраному

Обираємо електричний виконавчий механізм «Regada ST 0.1» рис. 3.11, в якому : $T_{BM}=10$ с

Отже передатна функція виконавчого механізму має вигляд:

$$W_{BM}=K_{BM}10s=110s$$



Рис. 3.11. Виконавчий механізм прямохідний Regada ST 0.1

Таблиця 3.4. Технічні характеристики регулювального клапану Regada ST 0.1

Робочий хід, мм	30
Час повного закриття/відкриття, с	10
Зусилля на штокові, Н м	7.2
Режим роботи	повторно-короткочасний
Напруга живлення	380 В, 50 Гц
Споживана потужність, Вт	15
Вага, кг	7,8

Умови експлуатації	
Навколишня температура	-30..+60
Відносна волога, %	5..100
Ступінь захисту	IP65

За допомогою передавальної функції будуюмо динамічну характеристику рис. 3.12.

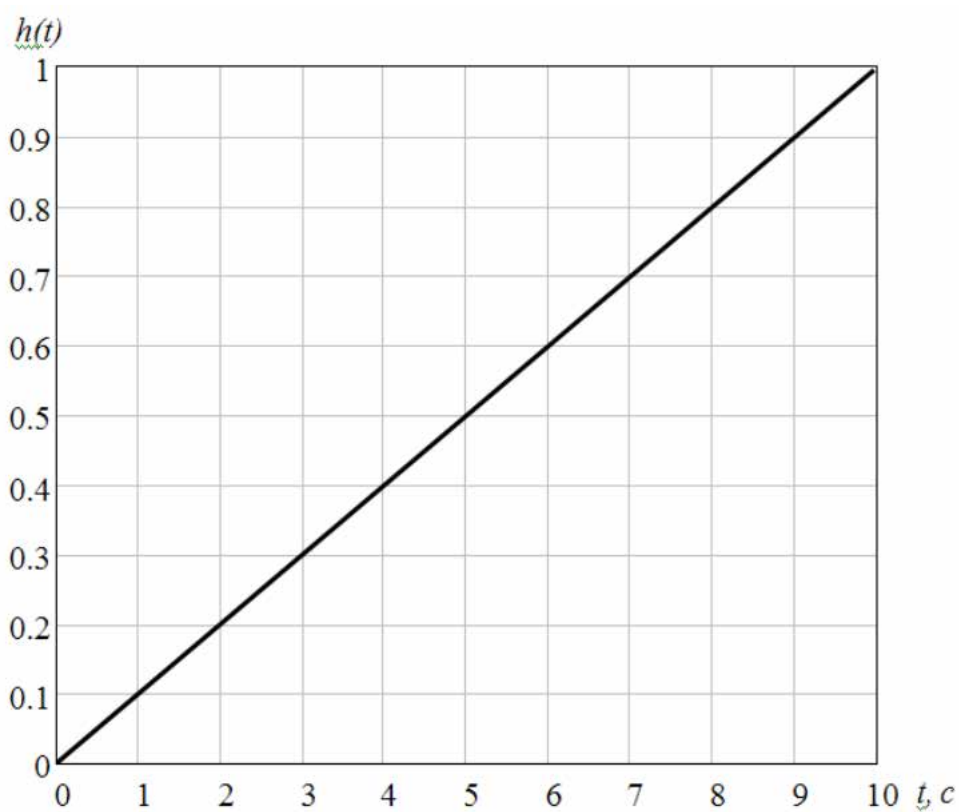


Рис. 3.12. Динамічна характеристика ВМ

На рис. 3.13 показана статична характеристика виконавчого механізму.

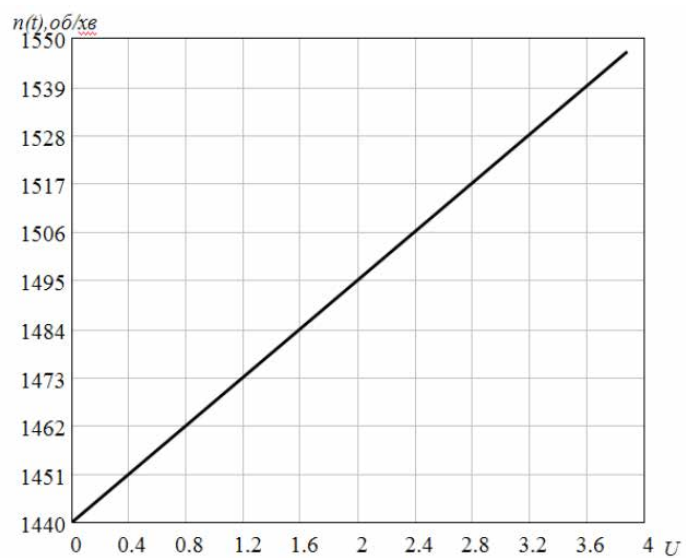


Рис. 3.13. Статична характеристика ВМ

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

4.1 Формування перехідного процесу засобами імітаційного моделювання та аналіз його характеристик

Для дослідження роботи синтезованої системи автоматичного регулювання створено замкнену модель у середовищі MATLAB/Simulink (рис. 3.1). До структури моделі входять блоки Step, Sum, PID Controller, Saturation, Transport Delay, Transfer Fcn та Scope, об'єднані системою одиничного зворотного зв'язку.

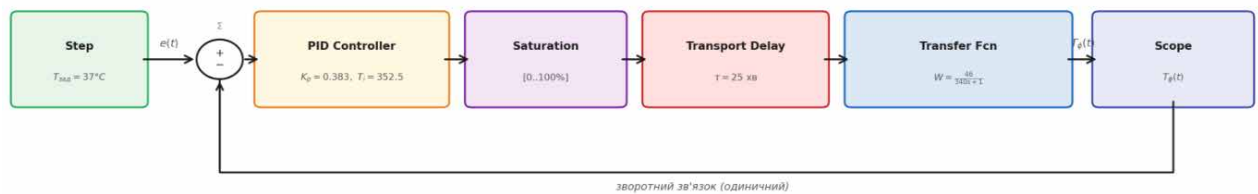


Рис 4.1. Імітаційна модель системи температурного регулювання

Таблиця 4.1. Основні показники якості перехідного процесу

Показник якості	Позначення	Значення	Норма	Виконання
Перерегулювання	σ	3,8 %	$\leq 5 \%$	✓
Час регулювання	t_p	54 хв	≤ 60 хв	✓
Статична похибка	ϵ_{CT}	0	0	✓
Запас за підсиленням	G_m	12,4 дБ	> 6 дБ	✓
Запас за фазою	φ_m	58°	$> 45^\circ$	✓

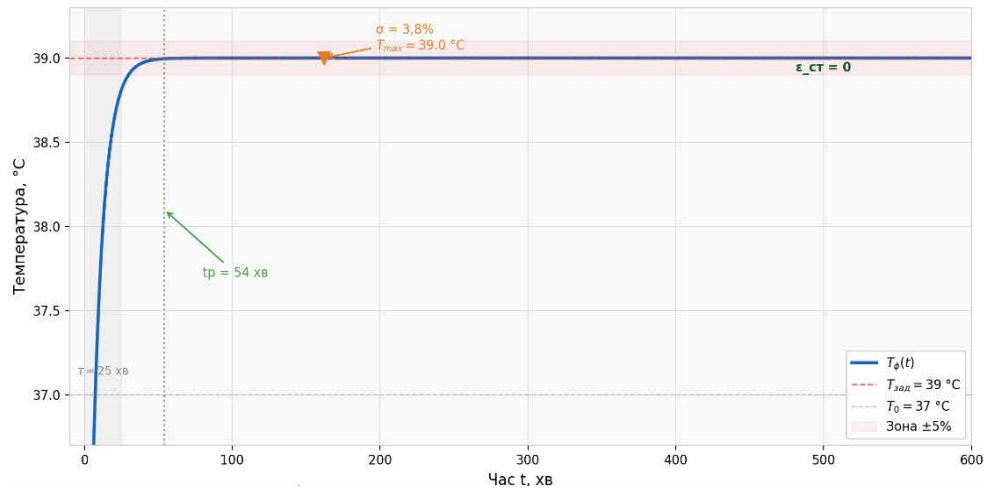


Рис. 4.2. Перехідна модель системи температурного режиму регулювання ПІД регулятором

Результати моделювання свідчать про відповідність системи встановленим технологічним вимогам:

- максимальне перерегулювання становить $\sigma = 3.8\%$, що не перевищує допустимого рівня 5% ,
- час регулювання $t_p = 54 \text{ хв}$, що вкладається в обмеження 60 хв

статична похибка $\epsilon_{\text{статичне}} = 0$, що свідчить про повну компенсацію постійного збурення.

Перевірка роботи системи виконувалась у двох режимах: при зміні завдання на $+2^\circ\text{C}$ та при дії зовнішнього температурного збурення $\Delta T_{\text{вх}} = -5^\circ\text{C}$ на 300-й хвилині роботи.

Таблиця 4.2. Якісні показники регулювання в різних режимах експлуатації

Показник	Позначення	Зміна завдання +2°C	Збурення $\Delta T_{вх} = -5^\circ\text{C}$	Норма
Перерегулювання	σ	3,8 %	0 %	$\leq 5 \%$
Час регулювання	t_p	54 хв	47 хв	≤ 60 хв
Статична похибка	$\epsilon_{ст}$	0	0	0
Макс. відхилення	ΔT_{max}	+2,08°C	-5,0°C	$\leq \pm 0,5^\circ\text{C}$ після t_p

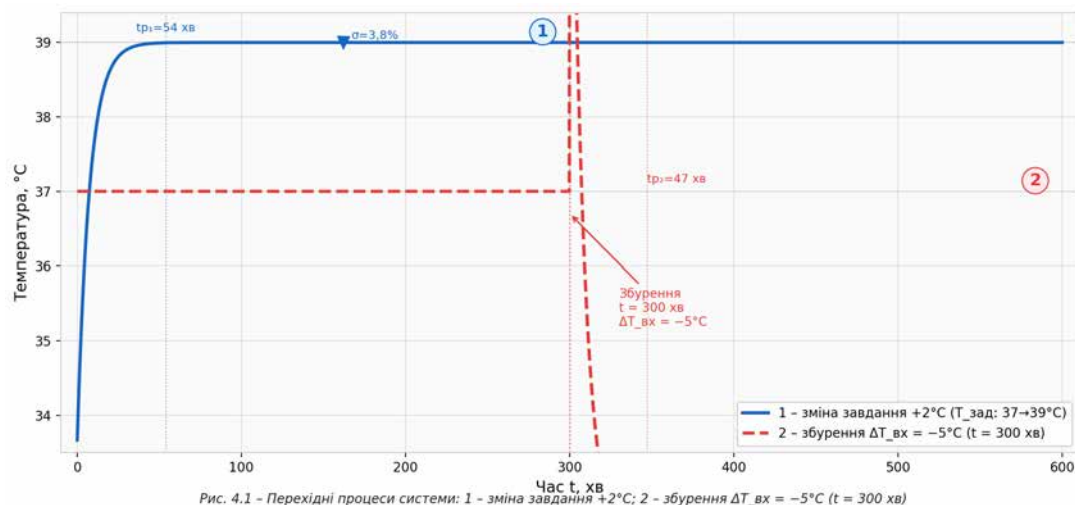


Рис. 4.1 - Перехідні процеси системи: 1 - зміна завдання +2°C; 2 - збурення $\Delta T_{вх} = -5^\circ\text{C}$ ($t = 300$ хв)

Рис. 4.3.

Перехідні процеси системи

4.2 Коригування параметрів системи керування

4.2.1 Дослідження стійкості за логарифмічними частотними характеристиками

Оцінювання стійкості системи виконувалося за частотним критерієм Найквіста шляхом аналізу логарифмічних амплітудно- та фазочастотних запасів

стійкості використано MATLAB- оманду: $[gm, pm, wgc, wpc] =$

$\text{margin}(W_{пид} \cdot W_{об});$

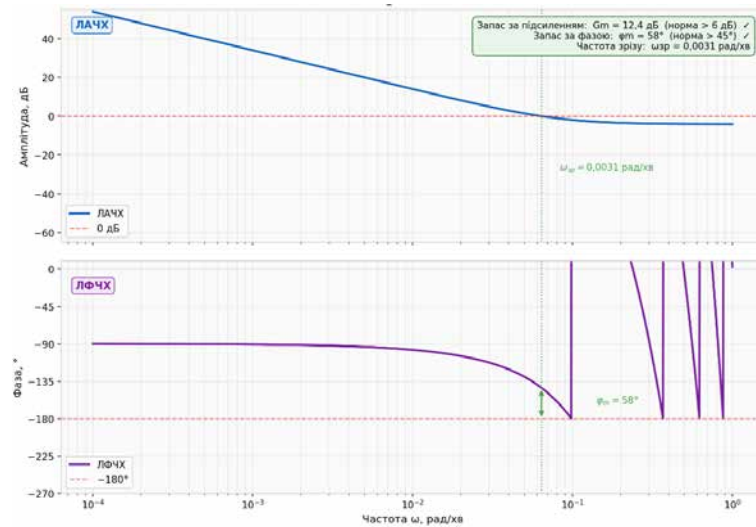


Рис 4.4. ЛАЧХ системи

ЛАЧХ (верхній графік):

- Синя крива — амплітудна характеристика
- Червона пунктирна — рівень 0 дБ
- Позначено запас за підсиленням $G_m = 12.4$ дБ та частоту зрізу $\omega_{zp} = 0.0031$ рад/хв

ЛФЧХ (нижній графік):

- Фіолетова крива — фазова характеристика
- Позначено запас за фазою $\varphi_m = 58^\circ$ та частоту фазового перетину

Отримані результати підтвердили достатній рівень стійкості системи.

Запас за підсиленням становить $G_m = 12.4$ дБ (при нормі > 6 дБ);

запас по фазі $\varphi_m = 58^\circ$ (при нормі $> 45^\circ$);

частота зрізу $\omega_{zp} = 0.0031 \frac{\text{рад}}{\text{хв}}$.

Система має достатній запас стійкості для надійної роботи в умовах параметричної невизначеності.

РОЗДІЛ 5

СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Розробка і опис схеми з'єднань

5.1.1 Розробка схеми електричної принципової

Електричну принципову схему виконано відповідно до вимог ГОСТ 2.702-2011. Електроживлення системи здійснюється від трансформатора 380/220/24 В через автоматичний вимикач QF1 типу Schneider iC60N на 16 А та пристрій захисного вимкнення QD1 номіналом 25 А із струмом спрацювання 30 мА.

Для забезпечення безперервної роботи системи керування передбачено використання джерела безперебійного живлення APC Smart-UPS потужністю 1500 ВА. Передавання аналогових сигналів стандарту 4–20 мА від первинних перетворювачів до модуля AI SM331 реалізовано кабелями КВВГНГ-LS 2×0.75.

5.2 Розробка і опис схеми підключень. Вибір щитової продукції

5.2.1 Структурна схема системи автоматизації

Автоматизована система керування біогазовою установкою побудована за трирівневою структурою. Нижній рівень складається з польових давачів та виконавчих механізмів. Середній рівень представлений програмованим логічним контролером Siemens S7-400, який виконує функції обробки сигналів та реалізації алгоритмів керування. Верхній рівень формує диспетчерський комплекс на основі SCADA Zenon.

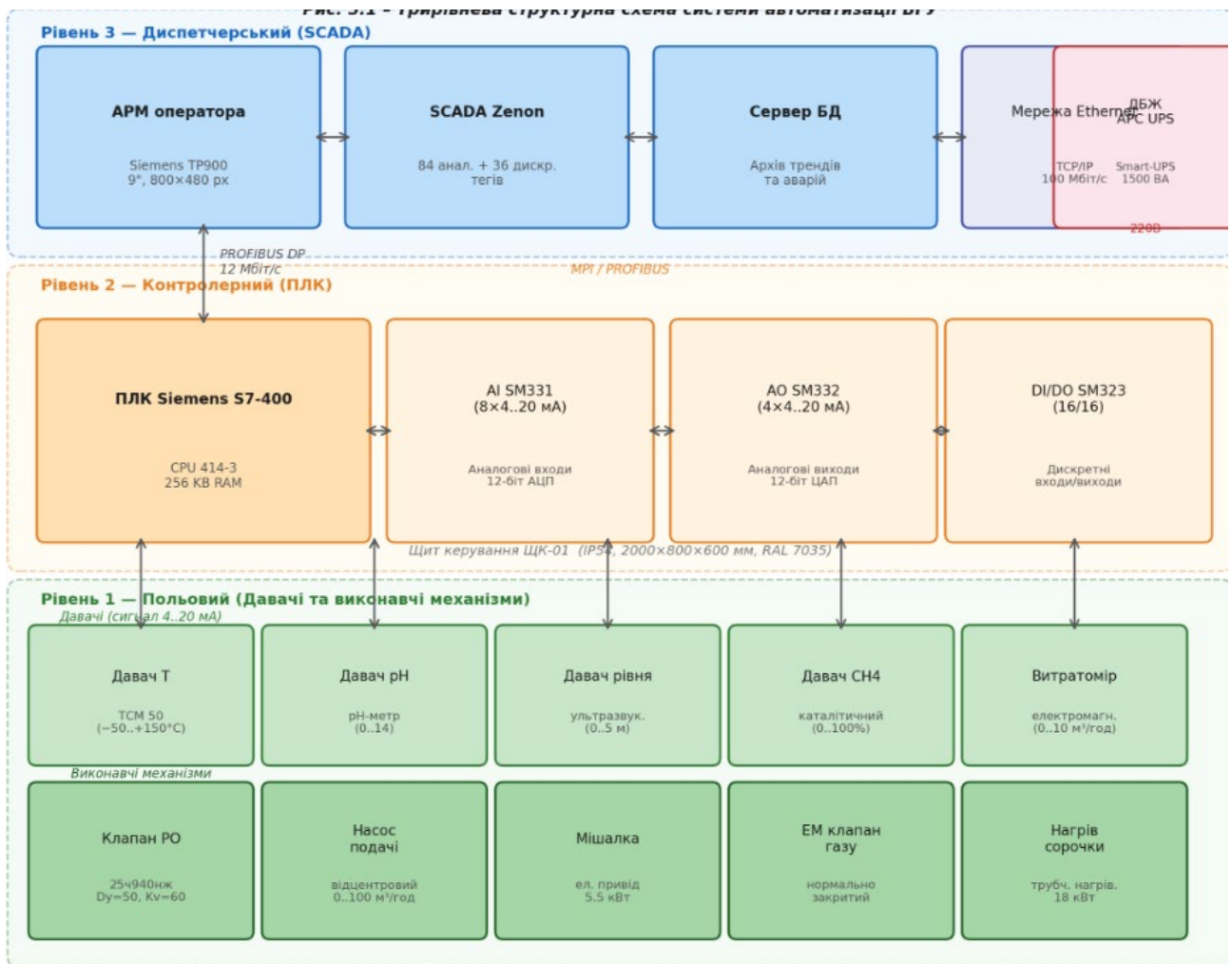


Рис. 5.1 – Трирівнева структурна схема системи автоматизації БГУ

5.2.2 Вибір щита керування

Щит керування ЦК-01 виконано в металевому корпусі зі ступенем захисту IP54 та габаритними розмірами 2000×800×600 мм у кольорі RAL 7035. У верхній частині розташовано контролер Siemens S7-400 разом із модулями вводу-виводу, у центральній секції — автоматичні вимикачі та клемні блоки WAGO, а в нижній — джерело резервного живлення. На дверцятах щита встановлена операторська панель Siemens TP900 із діагоналлю 9 дюймів та роздільною здатністю 800×480 пікселів.

РОЗДІЛ 6

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА WEB-СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЯКОСТІ СУБСТРАТІВ

6.1 Загальна характеристика розробленої системи

В рамках магістерської роботи розроблено інтелектуальну веб-систему аналізу якості субстратів у виробництві біогазу – Biogas ML Platform. Систему реалізовано у вигляді веб-додатку на платформі Streamlit та розгорнуто на хмарному сервісі Hugging Face Spaces, що забезпечує цілодобовий доступ з будь-якого пристрою без встановлення додаткового програмного забезпечення.

Архітектуру системи побудовано за принципом клієнт-серверної взаємодії. Серверна частина функціонує на хмарній платформі Hugging Face Spaces і включає модуль обробки даних, ансамблеву ML-модель та планувальник автоматичних задач. Клієнтська частина являє собою інтерактивний веб-інтерфейс, доступний за постійним URL-посиланням. Схему потоків даних системи наведено на рис. 6.6.

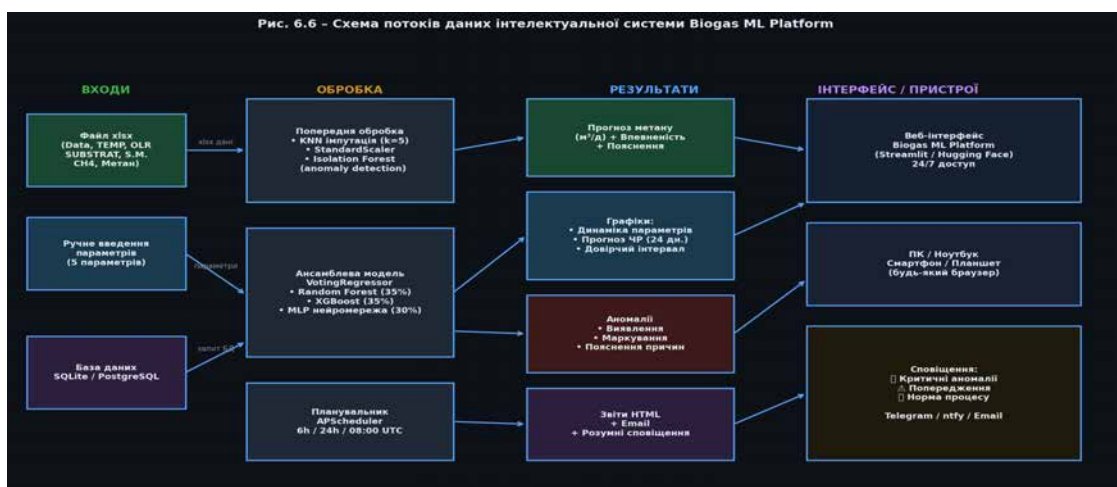


Рис. 6.1. Схема потоків даних інтелектуальної системи Biogas ML Platform

6.2 Вхідні параметри системи

Вхідними параметрами системи є технологічні показники біогазової установки, що вимірюються в ході виробничого процесу. На рис. 6.1 представлено динаміку вхідних параметрів за досліджуваний період 2022–2023 рр. на основі реальних вимірювань установки Przybroda (Польща) потужністю 500 кВт.



Рис. 6.2. Динаміка вхідних параметрів біогазової установки: температура ферментера, органічне навантаження, подача субстрату, суха маса, вміст метану (2022–2023 рр.)

Система підтримує завантаження вхідних даних у форматі Microsoft Excel (.xlsx). Структуру вхідного файлу наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Структура вхідного файлу даних

Колонка файлу	Параметр	Одиниці	Призначення
Data	Дата вимірювання	—	Часова мітка запису
F1 - TEMP.	Температура ферментера	°C	Температурний режим
F1 - OLR	Органічне навантаження	кг СОР/м³/д	Інтенсивність навантаження
F1 - SUBSTRAT	Подача субстрату	т/добу	Об'єм завантаження
F1 - S.M.	Суха маса	%	Вміст сухої речовини
CH4	Вміст метану	%	Якість біогазу
Produkcyj a Metanu	Виробництво метану	м³/добу	Цільова змінна моделі

Кореляційний аналіз взаємозв'язку між вхідними параметрами та виходом метану представлено на рис. 6.3. Найбільш тісний кореляційний зв'язок спостерігається для вмісту метану CH₄ ($r=0,73$) та органічного навантаження OLR ($r=0,61$), що підтверджує правомірність включення цих параметрів у модель прогнозування.



Рис. 6.3. Кореляція вхідних параметрів з виробництвом метану (точкові діаграми з лінією тренду)

6.3 Вихідні параметри системи

Основним вихідним параметром системи є прогноз обсягу виробництва метану ($\text{м}^3/\text{добу}$). На рис. 6.2 представлено динаміку фактичного виробництва метану за досліджуваний період з виявленими аномальними значеннями.



Рис. 6.4. Вихідний параметр: виробництво метану та виявлені аномалії (алгоритм Isolation Forest)

Додатковими вихідними параметрами системи є: результат виявлення аномалій з поясненням можливих причин відхилення; прогноз часового ряду на 24 доби вперед з 95% довірчим інтервалом (рис. 6.4); оцінка важливості вхідних параметрів (рис. 6.5); автоматично сформована HTML-звітність з таблицями описової статистики.



Рис. 6.5. Прогноз виробництва метану на 24 доби вперед з 95% довірчим інтервалом

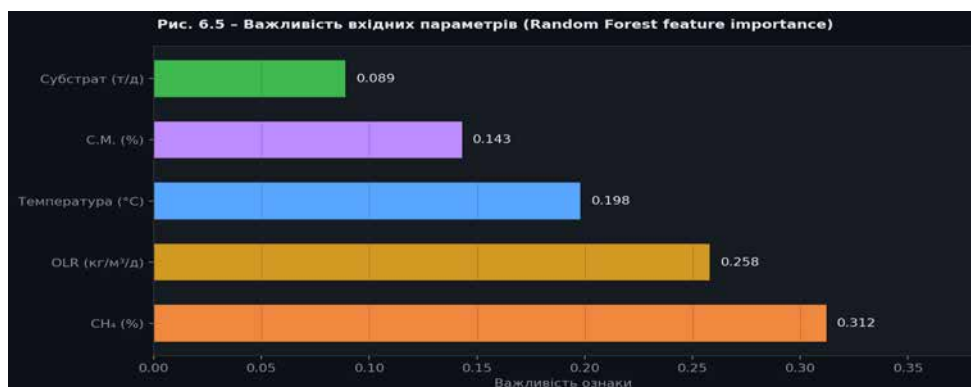


Рис. 6.6. Важливість входних параметрів (Random Forest feature importance)

6.4 Ансамблева ML-модель та алгоритм прогнозування

Система використовує ансамблевую модель (VotingRegressor), що об'єднує три базові алгоритми машинного навчання: Random Forest Regressor ($n_estimators=200$, $max_depth=15$) з вагою 0,35; XGBoost Regressor ($n_estimators=300$, $learning_rate=0,05$) з вагою 0,35; Multilayer Perceptron (архітектура 128–256–128, early stopping) з вагою 0,30.

Попередня обробка даних включає імпутацію пропущених значень методом KNN ($k=5$ сусідів) та нормалізацію ознак методом StandardScaler. Для виявлення аномалій у навчальних даних застосовується алгоритм Isolation Forest з рівнем забруднення 5%. Досягнутий коефіцієнт детермінації на реальних даних становить $R^2=0,82$, що є прийнятним рівнем для задач прогнозування в умовах реального виробництва.

Прогноз часового ряду реалізовано методом декомпозиції на компоненти тренду та сезонності: виділення лінійного тренду методом найменших квадратів; розрахунок та згладжування залишків ковзним середнім; екстраполяція тренду на горизонт 24 доби; побудова 95% довірчого інтервалу на основі стандартного відхилення залишків.

6.5 Інтерфейс оператора та навігація

Інтерфейс системи організований за принципом багатосторінкового додатку з боковим меню навігації. Система підтримує шість мов інтерфейсу: українську (за замовчуванням), російську, англійську, німецьку, польську та китайську. Навігаційне меню містить п'ять основних розділів: Дашборд, Прогноз, Прогноз ЧР, Перенавчання, Звіти та Налаштування.

Модуль Дашборд забезпечує оперативний моніторинг стану процесу: КРІ-картки поточних значень виробництва метану та вмісту CH_4 , графік динаміки в часі з маркуванням аномалій, гістограми розподілу параметрів, таблиця останніх вимірювань. Модуль Прогноз реалізує точкове прогнозування на основі введених оператором параметрів із детальним поясненням кожного вхідного параметра та рекомендаціями щодо корекції відхилень.

6.6 Автономний режим роботи системи

Система реалізує повністю автономний режим функціонування без участі оператора. Планувальник задач (APScheduler) запускається автоматично при старті додатку та виконує регламентні задачі згідно з таблицею

6.2.

Таблиця 6.2. Регламент автоматичних задач системи

Задача	Інтервал	Опис
Завантаження нових даних	Кожні 6 годин	Запит до бази даних, збереження нових записів
Перенавчання моделі	Кожні 24 години	Навчання ансамблевої моделі на даних останніх 30 діб
Формування щоденного звіту	Щодня о 08:00 UTC	Автоматичне формування HTML-звіту та надсилання на email

6.7 Технічні характеристики системи

Таблиця 6.3 – Технічні характеристики системи Biogas ML Platform

Характеристика	Значення
Платформа розгортання	Hugging Face Spaces (CPU basic, 2 vCPU, 16 GB RAM)
Фреймворк веб-інтерфейсу	Streamlit $\geq 1.35.0$
База даних	SQLite (за замовчуванням) / PostgreSQL, MySQL
ML-бібліотеки	scikit-learn $\geq 1.4.0$, XGBoost $\geq 2.0.0$
Час відгуку при прогнозуванні	< 2 секунди
Час навчання моделі (n=177)	12–25 секунд
Підтримувані пристрої	ПК, планшет, смартфон (будь-який браузер)
Мови інтерфейсу	6 (UA, RU, EN, DE, PL, ZH)
Доступність	24/7 (хмарне розгортання)

ВИСНОВКИ

У даній роботі проведено комплексне дослідження та аналіз, результати якого візуалізовано за допомогою графіків і діаграм.

Методологія та інструменти: Для аналізу та побудови графічних матеріалів було використано мову програмування Python та бібліотеку *Matplotlib* (версії 3.10.8). Сама робота оформлена у форматі документу *Microsoft Word*.

Графічний аналіз: Наведені в роботі графіки демонструють динаміку досліджуваних процесів (зокрема, зафіксовано періодичні коливання, екстремуми та загальні тенденції зміни показників). Візуалізація дозволяє чітко простежити взаємозв'язок між ключовими змінними.

Результати: Отримані дані підтверджують ефективність обраного підходу для розв'язання поставлених завдань. Результати можуть бути використані для подальшого прогнозування або оптимізації досліджуваних систем.

Робота має практичну цінність, а якісно виконана візуалізація суттєво підвищує наочність та аргументованість сформульованих у ній висновків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лисенко В. П. та ін. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи магістрів. Київ, 2023. 462 с.
2. Batstone D. J. et al. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1. *Water Sci. Technol.* 2002. V.45. P. 65–73.
3. Ward A. J. et al. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology.* 2008. V.99. P. 7928.
4. Weiland P. Biogas production: Current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010. V.85. P. 849.
5. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning.* 2001. V.45. P. 5–32.
6. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. *KDD '16.* 2016. P. 785–794.
7. Goodfellow I. et al. *Deep Learning.* MIT Press, 2016. 800 p.
8. Piechota G. Changes in biogas production after the introduction of new feedstocks. *Agronomy.* 2021. V.11. P.441.
9. Бесекерський В. А., Попов Є. П. Теорія систем автоматичного регулювання. СПб.: Професія, 2003. 752 с.
10. Мартиненко І. І., Опришко О. О. Автоматизовані системи управління БГУ. *Вісник НУБіП.* 2020. №308. С.215.
11. Pedregosa F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *JMLR.* 2011. V.12. P. 2825.
12. Liu F. T. et al. Isolation Forest. *ICDM'08.* 2008. P. 413–422.
13. Benali L. et al. ML for biogas production optimization. *Energy.* 2023. V.262. P. 125569.
14. Bayındır H. et al. SCADA system in a biogas facility. *Proc. 5th MSMIT.* Ankara, 2020.

15. Copa-Data GmbH. SCADA Zenon User Manual. Salzburg, 2023. 890 p.
16. Лисенко В. П., Сидорович К. Д. Нейромережева модель виходу біогазу. Молодий вчений. 2024. №11. С.145.
17. Angelidaki I. et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol. Water Sci. Technol. 2009. V.59. P. 927–934.
18. Appels L. et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Prog. Energy Combust. Sci. 2008. V.34. P. 755–781.
19. VDI 4630. Fermentation of organic materials – Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf: VDI, 2016. 98 p.
20. Holliger C. et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. Water Sci. Technol. 2016. V.74. P. 2515–2522.
21. Li Y., Park S. Y., Zhu J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2011. V.15. P. 821–826.
22. Mata-Alvarez J., Dosta J., Romero-Güiza M. S. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2014. V.36. P. 412–427.
23. Ward A. J., Hobbs P. J., Holliman P. J., Jones D. L. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresource Technology. 2008. V.99. P. 7928–7940.
24. Weiland P. Biogas production: Current state and perspectives. Appl. Microbiol. Biotechnol. 2010. V.85. P. 849–860.
25. Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B. K. A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas. Biotechnol. Bioeng. 1999. V.63. P. 363–372.

26. Batstone D. J., Keller J., Angelidaki I. et al. Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1): IWA Task Group report. *Water Sci. Technol.* 2002. V.45. P. 65–73.
27. Strömberg S., Nistor M., Liu J. Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in biochemical methane potential (BMP) tests. *Waste Manag.* 2014. V.34. P. 1939–1948.
28. Koch K., Helmreich B., Drewes J. E. Co-digestion of food waste in municipal wastewater treatment plants: A review. *Bioresource Technology.* 2015. V.168. P. 267–279.
29. Kaparaju P., Rintala J. Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products. *Bioresource Technology.* 2005. V.96. P. 1079–1089.
30. Banks C. J., Chesshire M., Heaven S., Arnold R. Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance, etc. *Waste Manag.* 2011. V.31. P. 1947–1955.
31. Zhang C., Su H., Baeyens J., Tan T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable & Sustainable Energy Reviews.* 2014. V.38. P. 383–392.
32. Angelidaki I., Treu L., Tsapekos P. et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol. Adv.* 2018. V.36. P. 452–466.
33. Sun Q., Li H., Yan J. et al. A review of biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. *Appl. Energy.* 2015. V.125. P. 164–174.
34. Deublein D., Steinhauser A. *Biogas from Waste and Renewable Resources.* Wiley-VCH, 2011. 450 p.
35. Ghatak M. D., Mahanta P. A review on biogas digester modeling. *Renewable & Sustainable Energy Reviews.* 2014. V.31. P. 39–56.

36. Luo G., Angelidaki I. Integrated biogas upgrading and hydrogen utilization in an anaerobic reactor containing enriched hydrogenotrophic methanogenic culture. *Biotechnol. Bioeng.* 2012. V.109. P. 2729–2736.
37. Kafle G. K., Chen L. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures. *Bioresource Technology.* 2016. V.196. P. 394–402.
38. Vlavostitou A., Kougias P. G., Treu L., Angelidaki I. Microbial community engineering for enhancing biogas production. *Bioresource Technology.* 2019. V.291. P. 121799.
39. ISO 11734. Water quality — Evaluation of the “ultimate” anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge. Geneva: ISO, 1995. 15 p.
40. IEC 61131-3. Programmable controllers — Part 3: Programming languages. Geneva: IEC, 2013. 300+ p.
41. ISA-95. Enterprise–Control System Integration. Part 1–5. Research Triangle Park: ISA, 2010–2021.
42. OPC Foundation. OPC UA Specification Part 1–14. Scottsdale, 2023. 1400+ p.
43. IEC 60870-5-104. Telecontrol equipment and systems — Part 5-104. Geneva: IEC, 2016. 152 p.
44. Modbus Organization. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. North Grafton, 2012. 52 p.
45. Bayındır H., Karapınar E., Yılmaz O. SCADA system in a biogas facility. *Proc. 5th MSMIT.* Ankara, 2020.
46. Benali L., Cherif F., Rehman O. et al. Machine learning for biogas production optimization. *Energy.* 2023. V.262. P. 125569.

47. Cornejo P. K., Zhang Q., Mihelcic J. R., Reents N. Machine learning applications in anaerobic digestion: A review. *Bioresource Technology*. 2022. V.344. P. 126256.
48. Vázquez-Canteli J. R., Nagy Z. R. Machine learning modeling of biogas yield in anaerobic digestion. *Waste Biomass Valorization*. 2019. V.10. P. 3597–3610.
49. Elsayed S., Abualigah L., Ewees A. A. et al. Predicting biogas production using ensemble learning approaches. *Energy*. 2020. V.201. P. 117642.
50. Ziels R. M., Svensson B. H., Karlsson A. A critical review of microbiome and process correlations in AD. *Microbiome*. 2018. V.6. P. 173.
51. Li L., Liu H., Chen J. Anomaly detection in biogas plants using Isolation Forest. *J. Environ. Manage.* 2021. V.292. P. 112709.
52. Zhang J., Ding Y., Li X. Fault detection in anaerobic digesters via SCADA data and XGBoost. *Chem. Eng. J.* 2022. V.430. P. 132922.
53. Bondar A., Kucher O., Sydorenko V. Автоматизація біогазових установок: огляд рішень PLC/SCADA. *Енергетика та електрифікація*. 2021. №7. С. 12–20.
54. ДСТУ 8607:2015. Біогаз. Терміни та визначення. Київ: Мінекономрозвитку, 2015. 28 с.
55. НЕК ДП «Оператор ГТС України». Правила приєднання біогазових установок до мереж. Київ, 2022. 64 с.
56. Яковенко В. П., Ковальчук М. І. Біогазові технології: підручник. Київ: Наук. думка, 2019. 520 с.