

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

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ННІ)

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

проф., д.т.н. _____ **В.В. Каплун**
(підпис) (ПІБ)

доц., к.т.н. _____ **О.О. Опришко**
(підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування температурним режимом в метантенках біогазової установки»

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)

Івашук В.В.
(П.І.Б)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **к.т.н., доцент**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

..... **Цигульов І.Т.**
(П.І.Б)

Виконав

_____ (підпис)

Коломієць В.В.,
(П.І.Б студента)

**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

К.Т.Н., доц. _____ **О.О. Опришко**

« _____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Коломійцу Валентину Віталійовичу

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 **«Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування температурним режимом в метантенках біогазової установки»**

затверджена наказом від 28.11.2026 року №2057«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. Офіційна настанова (завдання) від кафедри щодо змісту та обсягу магістерської роботи.
2. Чинні державні та галузеві нормативні документи, стандарти та правила, що стосуються проектування та впровадження систем автоматизації.
3. Зібрані та проаналізовані матеріали попередніх досліджень та аналітичних звітів.
4. Відповідна наукова та технічна література за темою магістерського проекту.

Дата видачі завдання «28» листопада 2024 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(Підпис)

Завдання прийняв до виконання

(Підпис)

Цигульов І.Т.

(Прізвище та ініціали)

Коломієць В.В.

(Прізвище та ініціали)

Анотація

Дипломна робота присвячена актуальному питанню підвищення ефективності метантенків для виробництва біогазу шляхом автоматичного контролю температури субстрату. Використання технологічного обладнання ОВЕН дозволяє забезпечити стабільність температурного режиму, що сприяє максимізації видобутку біогазу. У роботі представлено побудову математичної моделі керованого об'єкта, вибір алгоритмів та технічних засобів для автоматизації. Результати спрямовані на покращення роботи системи з мінімізацією витрат.

Abstract

The thesis is dedicated to addresses the critical issue of enhancing the efficiency of methane tanks for biogas production through automated substrate temperature control. Utilizing OVEN technological equipment ensures temperature stability, maximizing biogas yield. The work presents the development of a mathematical model of the controlled object, selection of algorithms, and technical solutions for automation. The results are aimed at improving system performance with minimized costs.

Зміст

ВСТУП	6
Розділ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ	7
1.1. Опис об'єкта керування. Класифікація реакторів метантенків	7
1.2. Способи завантаження і вивантаження субстрату	9
1.3. Принцип підігріву сировини	10
1.4. Розробка технологічної та функціональної схеми автоматизації	11
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	18
2.1. Побудова математичної моделі об'єкта керування	18
2.2. Дослідження імітаційної моделі об'єкта за допомогою MATLAB	20
РОЗДІЛ 3. ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ	22
3.1. Визначення передаточної функції та вибір оптимального алгоритму керування	22
3.2. Оцінка ефективності використання метану в біогазовій сировині з використанням нейромереж	25
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ	31
4.1. Вибір технічних засобів для реалізації системи керування	31
4.1.1 Розрахунок регулятора та його вибір	31
4.1.2 Вибір первинного перетворювача	33
4.1.3 Розрахунок та обрання параметрів виконавчих механізмів об'єкта керування	36
4.1.4 Розрахунок та вибір регулюючого клапану теплопроводу	40
4.2. Розробка електричної принципової схеми	42
4.3. Розробка схеми з'єднань	45
4.4. Розробка схеми підключень, вибір щита та щитової апаратури	46
4.5. Монтаж системи автоматичного керування	52
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	56

5.1. Розробка функціональної та структурно-алгоритмічної схеми САК	56
5.2. Побудова АФЧХ розімкненої САК	58
5.3. Побудова перехідного процесу замкненої системи	59
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА ДВОРІВНЕВОЇ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ	63
6.1 Розробка програми керування ПЛК ОВЕН 200	63
6.2 Структура комп'ютерно-інтегрованої системи	63
6.3. Розробка блок-схеми алгоритму роботи комп'ютерно-інтегрованої системи	64
6.4. Розробка програмного забезпечення за допомогою SCADA-системи Trace Mode	66
6.5. Використання хмарних технологій при автоматизації метантенку	72
РОЗДІЛ 7. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	75
7.1 Складання кошторису витрат на обслуговування обладнання метантенку	75
Висновки	77
Список використаних джерел	78
Додатки	80

ВСТУП

Актуальність теми людство рано чи пізно зіткнеться з проблемою коли в світі закінчиться газ, деякі країни вже зараз не мають свого газу та мають його купувати. Енергетична безпека держави залежить від різноманітності джерел енергії. Виробництво біогазу з відходів – це не лише екологічно чистий, а й економічно вигідний процес. Він *дозволяє* зменшити залежність від імпорту енергоносіїв та створити нові робочі місця. Використання метантенків для переробки органічних відходів, зокрема стічних вод, є ефективним способом отримання біогазу – цінного енергоносія. Також мул зі стічних вод потрібно перетворювати з активного в сирий аби полегшити його подальшу переробку. Цей процес не лише дозволяє утилізувати відходи, але й сприяє очищенню стічних вод та їх перетворенню на цінний ресурс.

Об'єкт дослідження – метантенк.

Предмет дослідження - автоматичне керування температури субстрату в метантенку.

Метантенки є ключовими елементами очисних споруд, призначеними для біологічного розкладання органічної частини осаду стічних вод в анаеробних умовах. Ці герметичні резервуари забезпечують оптимальні умови для розвитку мікроорганізмів, які перетворюють органічні речовини на біогаз. Для підвищення ефективності процесу в метантенках застосовується підігрів та механічне перемішування вмісту.

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Опис об'єкта керування. Класифікація реакторів метантенків

Метантенки є важливими компонентами анаеробних біореакторів, які використовуються для стабілізації осаду стічних вод через процес метаногенезу. Інтенсифікація метаногенезу досягається шляхом підтримання термофільного температурного режиму та активного перемішування біомаси. У результаті анаеробного розкладання органічних речовин виробляється біогаз, що містить метан, вуглекислий газ і незначну кількість інших газів.

З огляду на особливості процесу анаеробного зброджування, є конструкційні вищого, що висуваються метантенку, такі як:

- герметичність для запобігання втрат біогазу,
- достатня міцність для витримання статичних навантажень,
- ефективна теплоізоляція для підтримки оптимальної температури процесу,
- висока корозійна стійкість матеріалів, надійні системи завантаження та розвантаження субстрату,
- забезпечення зручного доступу до внутрішнього об'єму для проведення ремонтних робіт та технічного обслуговування.

До числа факторів, які впливають на діяльність бактерій та, відповідно, на вихід біогазу, відносять:

- **Температура:** Оптимальна температура для росту метаногенних бактерій залежить від їх типу. Відхилення від обраного оптимального температурного режиму може сповільнити або призупинити процес виробництва біогазу. Для теплофільних бактерій діапазон становить від 35°C до 55°C та для мезофільних бактерій від 25°C до 35°C. Відхилення від даних температурних режимів може сповільнити або зупинити життєдіяльність бактерій.

- **Кислотність (pH):** Оптимальним є слаболужне середовище оскільки Бактерії, що виробляють метан в ньому найкраще функціонують. Зміна pH може негативно вплинути на їхню активність. Оптимальними для функціонування бактерій є діапазон pH від 6,5 до 8, найкращим значенням буде 7 (нейтральний pH).

- **Склад субстрату:** Наявність токсичних речовин або важких металів у субстраті може пригнічувати ріст бактерій та зменшувати виробництво біогазу.

- **Відсутність кисню:** Метангенні бактерії є анаеробними, тобто вони не можуть нормально функціонувати в присутності кисню. Тому, для ефективного виробництва біогазу, система повинна бути повинна бути позбавлена доступу до кисню - герметичною. Оскільки у випадку не дотримання герметичності це може значно сповільнити та зупинити процес метаногенезу.

Реактори метантенків можуть бути побудовані з різноманітних матеріалів. Наприклад залізобетон, цегла, металеві цистерни нові та б/в.

Реактори метантенків можуть бути різних конструкцій та різнитися:

1. За місцем розташування. Залежно від типу конструкції, реактори поділяються на наземні, підземні та змішані

2. За формою реактора. Реактори метантенків можуть бути встановлені у вертикальному або горизонтальному положенні. Вертикальні реактори зазвичай мають циліндричну або конічну форму, а їх дно має ухил до центру для забезпечення ефективного перемішування вмісту. Горизонтальні реактори можуть бути прямокутними або циліндричними і частіше використовуються для великих біогазових установок.

3. Залежно від конструкції, покрівлі метантенків можна виділити на два основних типи: статичні та плаваючі. Плаваюча покрівля забезпечує високий рівень вибухобезпеки завдяки тому, що вільно рухається, знижуючи ризик утворення надмірного тиску всередині резервуара. Однак, такий тип покрівлі має недолік: в холодну пору року механізм плаваючої покрівлі може

обмерзнути, що ускладнює її функціонування. Статична покрівля, в свою чергу, не має таких проблем, оскільки є нерухомою і не потребує додаткового обігріву.

1.2. Способи завантаження і вивантаження субстрату

У метантенків (БГУ) існує кілька розгорнутих методів для здійснення завантаження і вивантаження субстрату. Одним із поширених методів завантаження та вивантаження субстрату в метантенках є переливний метод. Він передбачає заповнення реактора новим субстратом (наприклад, гноєм) до певного рівня. Коли бак заповнюється, надлишки витісняють відпрацьований матеріал та переливаються в окремий контейнер через призначену трубу. Таким чином відпрацьований матеріал безперервно видаляється з реактора. Цей метод відрізняється простотою конструкції та надійністю в експлуатації. Однак, його продуктивність обмежена об'ємом біомаси, який може бути завантажений або вивантажений за один цикл.

Механічний метод. Цей метод використовує різноманітні механізми для завантаження і вивантаження субстрату. Наприклад, можуть використовуватися конвеєри або шнекові транспортери для переміщення субстрату до реактора та з нього. Цей метод є більш автоматизованим та більш ефективний для великих масштабів установки, де необхідно обробляти великі обсяги субстрату. Однак, він може вимагати більшої початкової інвестиції на обладнання та потребує додаткового обслуговування та налагодження.

Також може використовувати метод ручного завантаження та вивантаження, при якому оператори самостійно завантажують свіжий субстрат у реактор і виводять зброджений матеріал після завершення процесу. Цей підхід підходить для малих установок з невеликим об'ємом субстрату та є зручним у випадках, коли необхідно здійснювати додаткове сортування або ретельний контроль над процесом завантаження та вивантаження.

1.3. Принцип підігріву сировини

У системі підігріву БГУ як правило використовують водонагрівуючий котел, який є типовою конфігурацією. Котел може працювати від різних джерел енергії, таких як електрична енергія, біогаз або тверде паливо. Теплообмінники для нагріву, мають форму змійовиків або паралельно зварених труб.

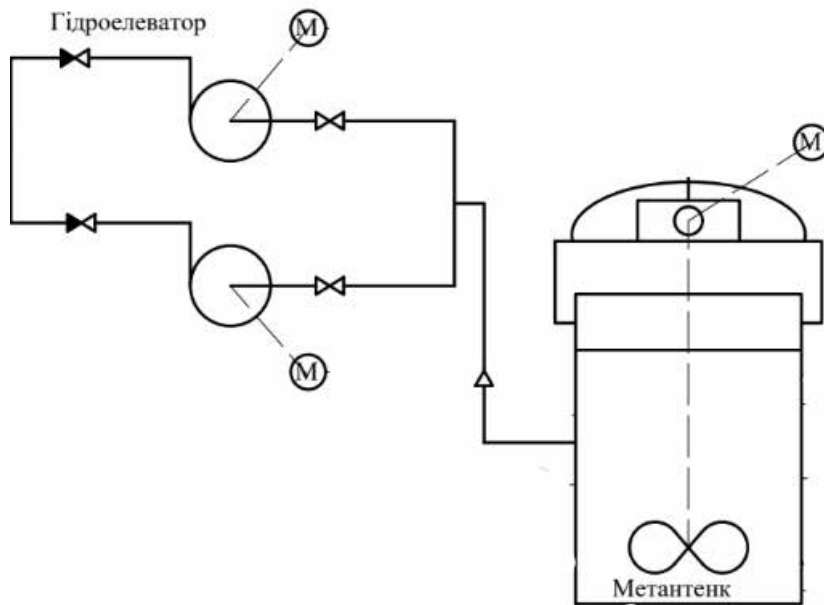


Рис. 1.1. Схема принципу підігріву сировини

Теплоносієм виступає гаряча вода, нагріта до близько 60°C. Водночас слід пам'ятати, що при надмірно високих температурах зростає ймовірність накопичення часток на поверхні теплообмінника, що може скоротити термін безперебійної роботи системи. Тому доцільно уникати надмірного нагріву.

Щоб уникнути осадження твердих частинок, теплообмінники бажано розташувати в зоні впливу перемішувача. Під час монтажу опалювальної системи важливо забезпечити природну циркуляцію рідини, подаючи гарячу воду в найвищу точку та відводячи охолоджену воду з найнижчої. Опалювальні трубопроводи повинні бути обладнані вентилями для випуску повітря у верхніх точках, а система підігріву — розширювальним бачком для

компенсації змін об'єму води. Для контролю температури в реакторі рекомендується встановити термометр або термостат.

Перемішування сировини в реакторі підвищує ефективність роботи БГУ та запобігає накопиченню твердих частинок на поверхні теплообмінника й дні реактора. Це може бути реалізовано за допомоги механічних перемішувачів, пропусканням біогазу через сировину або циркуляцією сировини з верхньої частини в нижню. Механічні перемішувачі можуть мати ручний привід і складаються з валу з прикріпленими лопатями або іншими елементами.

Прості механічні перемішувачі з ручним приводом легкі у використанні та виготовленні. Вони доцільні у невеликих реакторах з невеликою генерацією біогазу. Такі мішалки мають вертикально або горизонтально розташований вал, на якому кріпляться лопаті або інші елементи для перемішування сировини. До того ж валу можуть бути прикріплені елементи у формі гвинта, аби допомагати перемішувати сировину від місця вивантаження до місця завантаження, що збільшує швидкість утворення метану та скорочує час перебування сировини в реакторі.

1.4. Розробка технологічної та функціональної схеми автоматизації

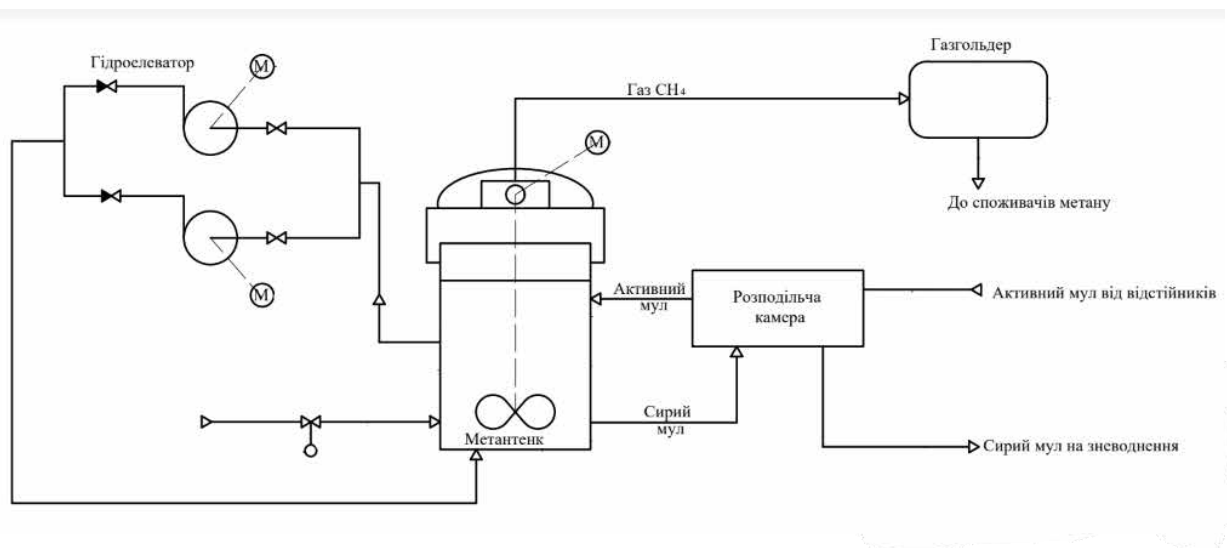


Рис.1.2. Техтологічна схема метантенку

Під час обробки нової сировини, яка надходить з розподільчої камери до метантенка, відбувається ефективне видобування біогазу, головним чином

метану. Активний мул містить велику кількість анаеробних мікроорганізмів, які відіграють важливу роль у метантенку, де завдяки системі підігріву створюються оптимальні температурні умови. Це стимулює активність мікроорганізмів та підвищенню ефективності виробництва метану.

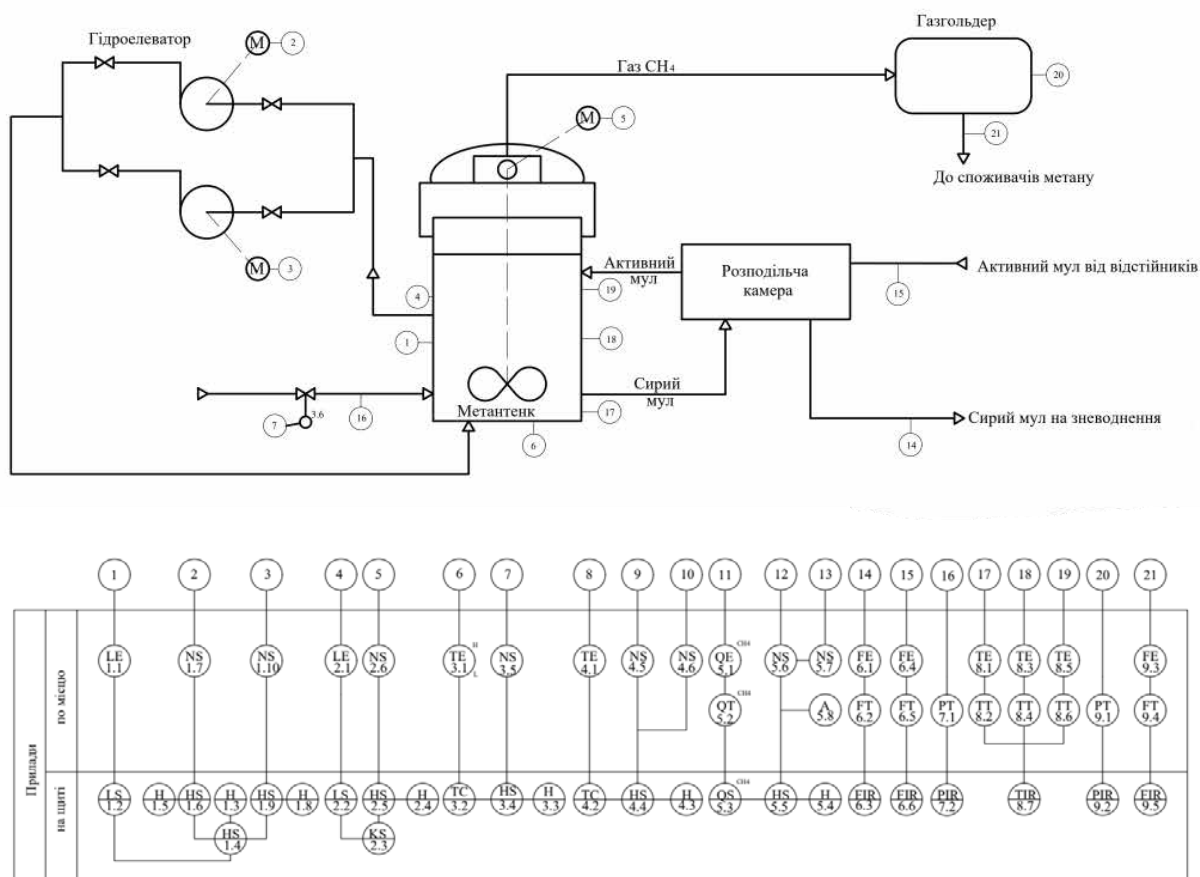


Рис. 1.3. Функціональна схема автоматизації виробництва метантенку

За для ефективного використання об'єму метантенка та запобігання утворенню мертвих зон, осадження та кірки, необхідне регулярне перемішування осаду. За для цього встановлюються всередині резервуара пристрої такі як перемішувачі або гідроелеватори. Їх форма, розмір і конструкція обираються залежно від характеристик кожного метантенка. Вони забезпечують рівномірне змішування та оптимізацію процесу.

Під час роботи метантенка в його камері накопичується біогаз, утворений в результаті біологічних процесів. Цей газ збирається трубопроводом на плаваючому даху та транспортується до газгольдера, де зберігається до

моменту використання. З газгольдера біогаз подається до споживачів для використання в енергопостачанні, опаленні або різних виробничих процесах.

Автоматичні системи керування температури в метантенку надають можливість забезпечити потрібний температурний режим для біомаси. Стабільна температура в межах 35-60°C є важливим фактором для процесу ферментації та ефективного виділення газу. Це дозволяє створити сприятливі умови для активності мікроорганізмів, що прискорює утворення біогазу та підвищує загальну продуктивність процесу. Для досягнення необхідної температури використовуються водонагрівні котли, які уможливають постійний підігрів сировини в реакторі, тим самим стабілізуючи умови роботи системи і сприяючи максимальному видобутку біогазу.

Для регулювання температури біомаси в біореакторі змінюється обсяг гарячої води, що циркулює через теплообмінник. Цей процес контролюється краном у магістралі, яка подає гарячу воду з котла до теплообмінника, що служить регулюючим елементом для біореактора. При постійній температурі води в системі відбувається автоматичне корегування: відкриття крана збільшує потік гарячої води через теплообмінник, відповідно, збільшує кількість тепла, яке надходить до біореактора. Регулювання здійснюється за допомогою регулятора температури, який подає керуючу напругу на електропривід клапану, кут повороту заслінки в крані та контролюючи подачу гарячої води, що проходить через клапан(фкр).

Основними факторами, що впливають на зміну температури біомаси в реакторі при постійному значенні керуючого впливу ($f_{кр} = \text{const}$), є атмосферні умови ($f(t)$), зокрема температура середовища на зовні. Керованою величиною є температура біомаси всередині біореактора ($\Theta(t)$), яка забезпечує стабільність процесу ферментації та ефективне виробництво біогазу.

На інформаційній схемі бак метантенку, як об'єкт регулювання температури, має вигляд (рис. 1.4):

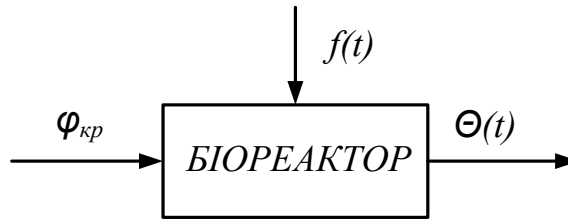


Рис. 1.4. Інформаційна схема біореактора

У процесі розробки автоматичної системи керування необхідно врахувати її призначення, принцип роботи та оптимальне розташування функціональних елементів з урахуванням послідовності їх взаємодії. Основним завданням такої системи є забезпечення стабільної температури біомаси в реакторі на заданому рівні, що сприяє ефективному перебігу процесів і досягненню максимальних результатів. У системі автоматичного керування (САК) вхідними сигналами виступають задане значення температури біомаси $\Theta_0(t)$ у ферментаторі, що є корисним сигналом, та температура навколишнього середовища $f(t)$, яка виступає як збурення. Ці параметри визначають роботу системи, впливаючи на підтримку стабільного температурного режиму біомаси в умовах змін навколишнього середовища. Вихідним сигналом САК є поточне значення температури біомаси $\Theta(t)$ у метантенку, яке подається на вхід системи. Таким чином, САК працює за принципом керування по відхиленню, регулятор робить оцінку різниці між заданою температурою та фактичною температурою біомаси. На основі цієї різниці приймаються рішення щодо корекції роботи системи для підтримки заданого температурного режиму. Отримуємо узагальнену функціональну схему САК (рис. 1.5).

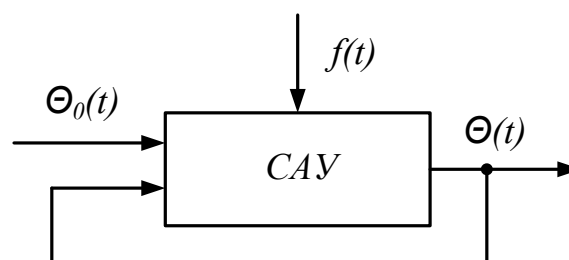


Рис. 1.5. Узагальнена функціональна схема САК з температурним режимом у модульному біореакторі

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Побудова математичної модель об'єкта керування

Біореактор можна моделювати як двовимірний об'єкт, використовуючи два диференціальні рівняння для опису його поведінки.

$$\begin{cases} Mc \cdot Cc \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Cc \cdot Gc \cdot H \frac{\partial \theta}{\partial x} = \alpha \cdot f \cdot (t - \theta) - K \cdot F \cdot (\theta - t_3); \\ Mt \cdot Ct \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} + Ct \cdot Gt \cdot H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \cdot f \cdot (t - \theta), \end{cases} \quad (2.1)$$

де θ , t , t_3 – температура біомаси, теплоносія та навколишнього середовища,

M_c , G_c – маса біомаси і пропускна здатність реактора відповідно кг, кг/с,

M_t , G_t – маса води в теплообміннику і його витрати кг, кг/с,

α , K – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до субстрату і коефіцієнт теплопередачі крізь стінку корпусу,

C_c , C_t – питома теплоємність біомаси і теплоносія (води),

K_t , K_k – коефіцієнт теплопередачі теплообмінника і корпусу Вт/м $\cdot$ °С,

f , F – поверхня нагрівача і корпусу.

Для досягнення стабільної температури води в награвальному елементі і біомаси в метантенку використовують їхні вихідні значення як регулюючі параметри, позначені як $t_{\text{вих}}$ (температура води) і $\theta_{\text{вих}}$ (температура біомаси), тому беручи мінімальне значення змінення температури t і θ в напрямку руху, тобто:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \cong \frac{\Delta \theta}{\Delta x} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{H}; \quad \frac{\partial t}{\partial x} \cong \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t_2 - t_1}{H},$$

тоді систему (2.1) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} M_c \cdot C_c \cdot \frac{d\theta_2}{d\tau} = C_c \cdot G_c \cdot (\theta_1 - \theta_2) + K_t \cdot F_t \cdot (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) - K_{\hat{e}} \cdot F_{\hat{e}} \cdot (\bar{\theta} - t_3); \\ M_t \cdot C_t \cdot \frac{dt_2}{d\tau} = C_t \cdot G_t \cdot (t_1 - t_2) - K_t \cdot F_t \cdot (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c), \end{cases} \quad (2.2)$$

$$(2.3)$$

де M_c, G_c – маса біомаси і пропускна здатність реактора відповідно кг, кг/с;

M_t, G_t – маса води в теплообміннику і його витрати кг, кг/с;

C_c, C_t – питома теплоємність біомаси і води;

K_t, K_k – коефіцієнт теплопередачі теплообмінника і корпусу Вт/м²·°C;

F_t, F_k – поверхня теплообміну теплообмінника і корпусу м²;

t_2, θ_2 – температура теплоносія і біомаси на виході;

°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.

Розрахунки виконано в середовищі MathCad. Вхідні параметри:

- температура теплоносія (води в трубопроводі), °C: $t_1 = 90$,
- температура біомаси, °C: $\theta_1 = 15$,
- температура зовнішнього середовища, °C: $t_z = -4$,
- коефіцієнти теплопередачі теплообмінника, Вт/м²·°C: $K_t = 154$,
- коефіцієнт теплопередачі стінок реактора (0,8...1,5),
Вт/м²·°C, $K_k = 1.2$,
- маса теплоносія в теплообміннику, кг: $M_t = 300$,
- маса біомаси в біореакторі, кг: $M_c = 11000$,
- питома теплоємність біомаси, Дж/кг·°C: $C_c = 4200$,
- питома теплоємність теплоносія, Дж/кг·°C: $C_t = 4190$,
- пропускна здатність біореактора, кг/с: $G_c = 0.01$,
- витрата тепла в теплообміннику, кг/с: $G_t = 0.012$,
- поверхня теплообміну в теплообмінника, м²: $F_t = 3$,
- поверхня теплообміну стінок біореактора, м²: $F_k = 16$,
- час за який відбувається процес анаеробного бродіння біомаси в біореакторі(при повному завантаженні реактора), кг: $\tau = 0...200$.

Розрахуємо допоміжні коефіцієнти:

$$a1 := \frac{G_c \cdot C_c + 0.5 \cdot (K_t \cdot F_t + K_k \cdot F_k)}{0.5 \cdot K_t \cdot F_t} = 5.88 \cdot 10^9; \quad (2.4)$$

$$a2 := \frac{G_t \cdot C_t + 0.5 \cdot K_t \cdot F_t}{0.5 \cdot K_t \cdot F_t} = 1.676 \cdot 10^4; \quad (2.5)$$

$$b1 := \frac{G_c \cdot C_c - 0.5 \cdot (K_t \cdot F_t + K_k \cdot F_k)}{0.5 \cdot K_t \cdot F_t} = 5.88 \cdot 10^9; \quad (2.6)$$

$$b2 := \frac{G_t \cdot C_t - 0.5 \cdot K_t \cdot F_t}{0.5 \cdot K_t \cdot F_t} = 1.676 \cdot 10^4; \quad (2.7)$$

$$T1 := \frac{M_c \cdot C_c}{0.5 \cdot K_t \cdot F_t} = 1.4 \cdot 10^{10}; \quad T2 := \frac{M_t \cdot C_t}{0.5 \cdot K_t \cdot F_t} = 4.19 \cdot 10^8; \quad (2.8)$$

$$A := T1 \cdot T2 = 5.866 \cdot 10^{18}; \quad (2.9)$$

$$B := a1 \cdot T1 + a2 \cdot T2 = 8.232 \cdot 10^{19}; \quad (2.10)$$

$$C := (a1 \cdot a2 - 1) = 9.855 \cdot 10^{13}; \quad (2.11)$$

$$D := (a2 + b2) \cdot t1 + (a2 \cdot b2) \cdot \theta1 + a2 \cdot K_k \cdot F_k \cdot t_z = 4.22 \cdot 10^9; \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} D1 := (a1 \cdot b1 + 1) \cdot t1 + (a1 + b1 + a1 \cdot a2) \cdot \theta1 + a1 \cdot K_k \cdot F_k \cdot t_z = \\ = 3.112 \cdot 10^{21}; \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$B1 := (a1 + a2 + T1) \cdot 2 + (b1 \cdot b2 + 1) \cdot 2 = 1.971 \cdot 10^{14}; \quad (2.14)$$

$$C1 := [(a1 \cdot a2 + 1) + (b1 \cdot b2)] \cdot 2 + (b1 \cdot b2) = 4.927 \cdot 10^{14} \quad (2.15)$$

Знаходимо корені характеристичного рівняння:

$$r1 := \frac{-B + \sqrt{B^2 - 2 \cdot A \cdot C1}}{4 \cdot A} = -3.508 + 3.24i \cdot 10^{-3}; \quad (2.16)$$

$$r2 := \frac{-B - \sqrt{B^2 - 2 \cdot A \cdot C1}}{4 \cdot A} = -3.508 - 3.24i \cdot 10^{-3}. \quad (2.17)$$

Для створення моделі в системі Simulink MATLAB використовуємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} M_c \cdot C_c \cdot \frac{d\theta_2}{d\tau} = C_c \cdot G_c \cdot (\theta_1 - \theta_2) + K_t \cdot F_t \cdot (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c) - K\hat{e} \cdot F\hat{e} \cdot (\bar{\theta} - t_3); \\ M_t \cdot C_t \cdot \frac{dt_2}{d\tau} = C_t \cdot G_t \cdot (t_1 - t_2) - K_t \cdot F_t \cdot (\bar{t}_T - \bar{\theta}_c). \end{cases}$$

2.2 Дослідження імітаційної моделі об'єкта за допомогою MATLAB

Для ефективного розв'язання системи рівнянь (2.2) і (2.3) необхідно вводити дані за допомогою блоків Constant. Ці дані включають параметри, такі як M_c (маса каталізатора), M_T (маса теплоносія), G_t (потік маси теплоносія), G_c (потік маси субстрату), C_c (теплоємність субстрату), C_t (теплоємність теплоносія), K_t (тепловий коефіцієнт теплоносія), K_k (тепловий коефіцієнт субстрату), t_1 (початкова температура теплоносія), θ_1 (початкова температура субстрату) та t_3 (t_{zc}) (температура навколишнього середовища).

Після введення цих даних праві частини рівнянь формуються за допомогою блоків Sum і Product. Для обчислення значень рівнянь використовуються блоки Gain. Отримані результати передаються до блоків Integrator, які виконують інтеграцію та забезпечують оновлення значень параметрів у часі.

Початкові значення для блоків розв'язку Integrator встановлюються таким чином: $t_1 = 90^\circ\text{C}$, що є початковою температурою теплоносія, та $\theta_1 = 15^\circ\text{C}$, що є початковою температурою субстрату. Ці параметри визначаються для коректного старту процесу інтегрування та подальшого розрахунку температурних змін у системі. Невірно вибране початкове значення, наприклад нульове, може призвести до розрахункових помилок і неточностей у моделюванні процесу.

Для відображення значень температур t_2 і θ_2 використовуються блоки Scope, а їх встановлення можливо здійснити за допомогою блоку Display. Для ілюстрування результатів застосовується стала часу об'єкта, яка визначається

як період стабілізації процесу, наприклад, 16 годин. Це дозволяє ефективно відстежити динаміку змін температури та стабілізацію у процесі.

У параметрах моделювання, відкривши меню Simulation->Simulation Parameters, необхідно вказати тривалість моделювання у полі Stoptime, наприклад, 80000 секунд. Ту ж саму тривалість слід встановити у вкладці General блоку Scope в полі Time range, щоб забезпечити узгоджене відображення даних.

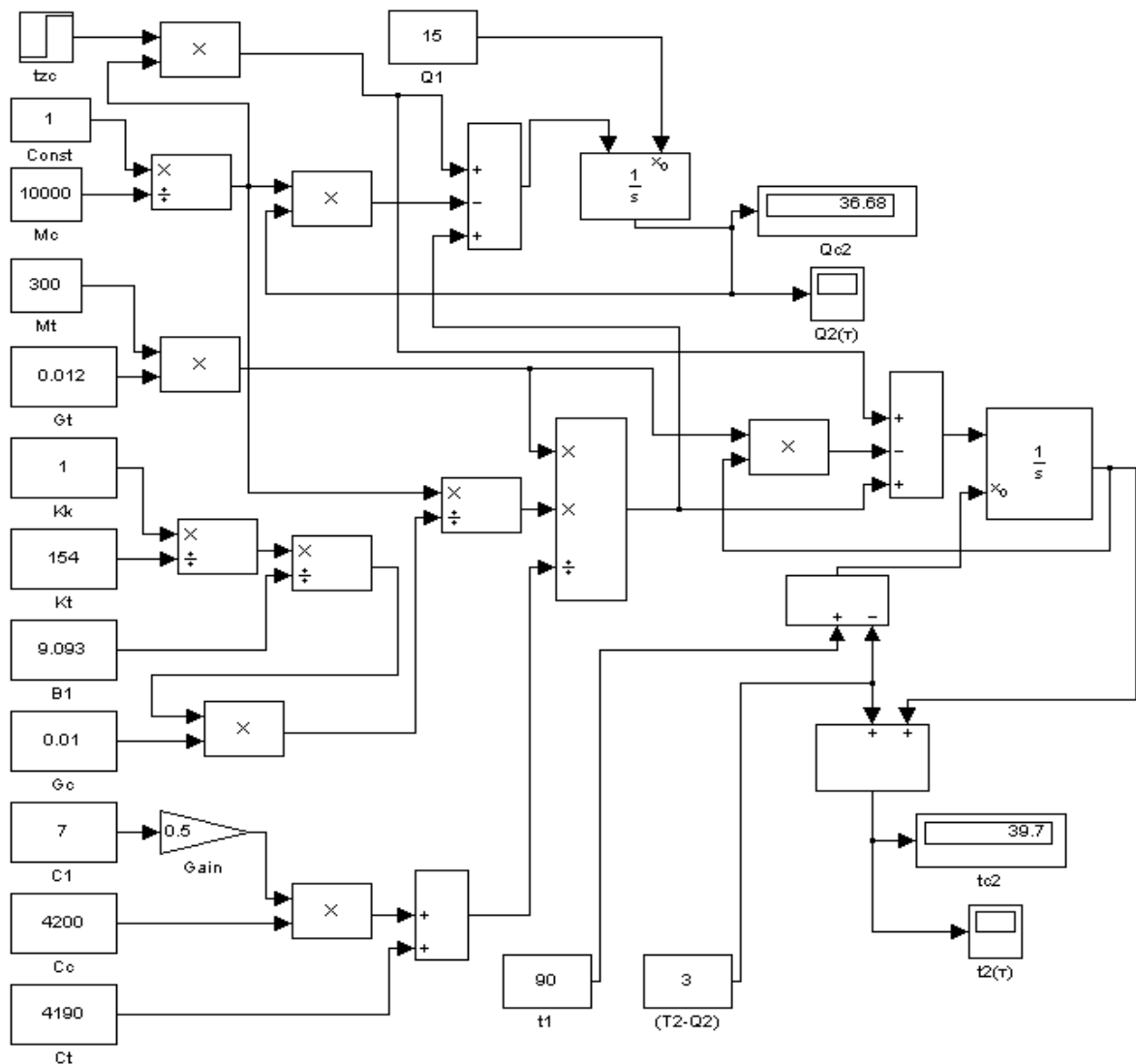


Рис. 2.1. Схема моделі нагрівання субстрату (θ) при охолодженні теплоносія (t) в блоках "Simulink Matlab"

Аби запустити модель необхідно виконати команду Start з меню Simulation. Щоб переглянути результати обчислень, необхідно двічі клацнути на блоках Scope ($Q_2(\tau)$, $t_2(\tau)$) - це відкриє вікна з графіками цих блоків.

Аби налаштувати масштаб графіків потрібно натиснути кнопку Autoscale в меню, і відбудеться автоматичне налаштування масштабу осей для зручного відображення даних. Завдяки цьому краще сприймаються графіки та спрощує їх аналіз (рис. 2.1).

На рис. 2.2 і 2.3 зображено розгінні криві зміщення в часі температури теплоносія (а) і субстрату (б).

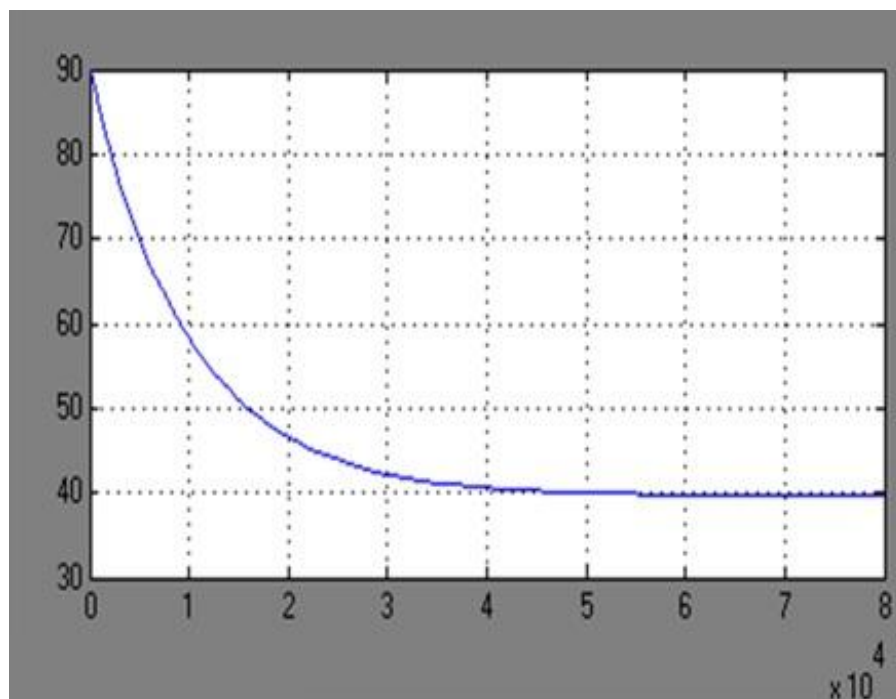


Рис. 2.2. Розгінна крива зміщення в часі температури теплоносія

Для підтримки заданої температури та підігріву біомаси в кожному модулі метантенка необхідно встановити нагрівальні елементи. Розрахунок теплової потреби здійснюється, з припущенням, що для нагрівання 1 кілограма субстрату на 1°C потрібно 4200 Дж теплової енергії. Отримане тепло використовується для підігріву субстрату та компенсування теплових втрат системи.

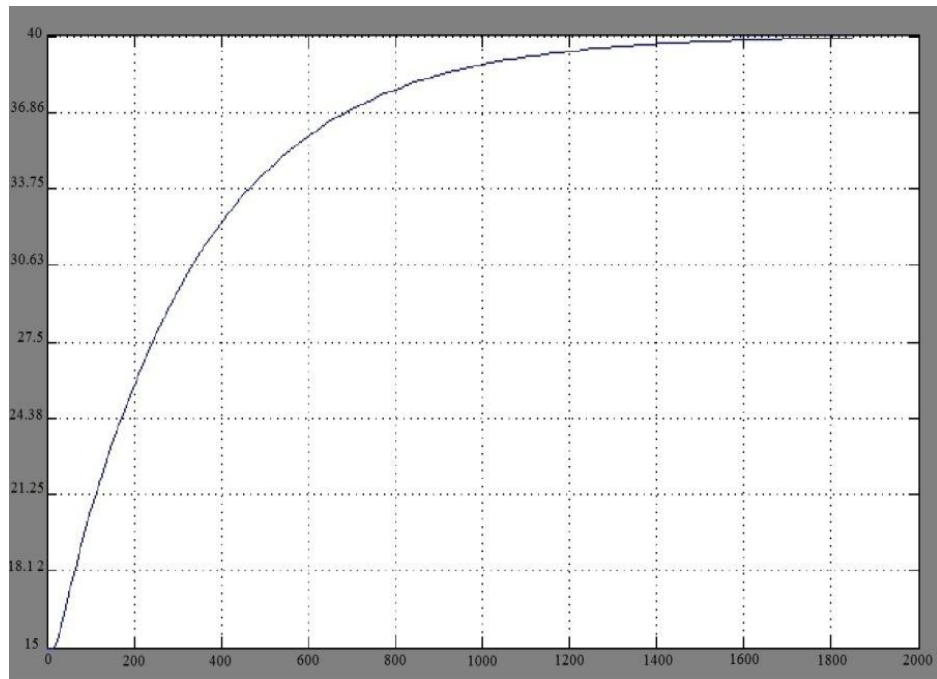


Рис. 2.3. Розгінна крива зміщення в часі температури біомаси

Температурний канал в БГУ можна уявити як інерційну ланку першого порядку, що означає наявність затримки та інерції в реакції субстрату на регулюючий вплив. Інакше кажучи, системі потрібен певний час, щоб досягти стабільного стану після зміни регулюючого сигналу.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

3.1 Визначення передаточної функції

Для ефективного зброджування в мезофільному режимі, який відбувається при температурі від 32 до 42 °С, необхідно забезпечити стабільність температури процесу. Дослідження показують, що цей температурний діапазон є найоптимальнішим для активності метаногенних бактерій, що сприяють інтенсивному утворенню біогазу.

Для підтримання стабільної температури зброджування використовують систему прокачування нагрітої води через теплообмінники, розташовані в метантенку. Вода нагрівається за рахунок частини виробленого біогазу, приблизно 30-40 % від загального обсягу, який використовується в котельному агрегаті.

Важливо враховувати теплові втрати через захисні конструкції метантенку, а також вплив зовнішніх температур на її режими роботи. Для цього необхідно визначити складові теплового балансу та розрахувати тепловтрати з внутрішнього середовища, позначені як Q_B (у ватах). Ця величина залежить від термічного опору захисних матеріалів та різниці температур між середовищем усередині реактора та зовнішнім середовищем.

Формула для обчислення тепловтрат має наступний вигляд:

$$Q_B = \alpha_T \cdot (T_B - T_3) n_1 \cdot F_B \cdot \eta_n, \quad (3.1)$$

де $\alpha_T = \frac{1}{R}$ коефіцієнт теплопередачі конструкції реактора, Вт/(М²°С);

R – термічний опір теплопередачі матеріалу конструкції та тепловіддачі з обох боків конструкцій, (М²*°С)/Вт;

$(T_B - T_3)$ – розрахункова різниця між температурами ззовні та всередині, °С;

n_1 – коефіцієнт поправки, що враховує зменшення розрахункової різниці температур для матеріалу конструкції метантенка. (для даного випадку $n = 1$);

F_6 – площа поверхні матеріалу конструкції реактору метантенку, м² ($F_6 = 1 \text{ м}^2$);

η_n – коефіцієнт, що враховує додаткові тепловтрати, може змінитися під впливом сонячного випромінювання, інфільтрації та ексфільтрації, $\eta_n = 1$;
 Передатна функція визначається на основі даних, отриманих із імітаційної моделі. (див. рис. 2.2. та 2.3). Крім того, в таблиці 3.1 вказуються розгінні характеристики, а в таблиці 3.2 - нормована розгінна характеристика метантенку.

t, c	0	10	40	900	140	200	240	290	340	390	430	490	540	600
$\Theta, ^\circ C$	0	0	8	12,4	15,3	19,2	21,8	23,6	26,8	28	30	31	32,5	0
t, c	640	690	740	790	840	890	940	1000	1040	1090	1140	1090	1240	140
$\Theta, ^\circ C$	32,4	34	34,5	35,5	35,8	36,5	36,8	36,9	37	37,5	38	39	39,26	39,5
t, c	135	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850			
$\Theta, ^\circ C$	38,3	38,5	38,6	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,7	39			

Таблиця 3.1.

Вихідні дані розгінної характеристики ОУ

Таким чином, дані для нормованої розгінної характеристики отримуються кожні 50 секунд у діапазоні температур від 0 до 37 °С та розраховуються за формулою:

$$\Theta = \frac{\Theta_i - \Theta_0}{\Theta_{уст} - \Theta_0}, \quad (3.2)$$

де

Θ_i – поточне значення; $\Theta_{уст}$ – установлене значення;

Θ_0 – початкове значення.

Для даного випадку $\Theta_0 = 0, \Theta_{уст} = 40$.

Побудувавши розгінну нормовану характеристику (рис. 3.1), знаходимо:

$K_{об} = 0.02$; постійна часу – $T_{об} = 320$ с; час запізнення - $\tau_{об} = 20$ с.

Таблиця 3.2. Дані нормованої розгінної характеристики

t, c	0	20	50	100	150	200
$\Theta, ^\circ C$	0	0	0,067	0,195	0,277	0,399
t, c	650	700	750	800	850	900
$\Theta, ^\circ C$	0,83	0,84	0,879	0,91	0,920	0,93
t, c	1350	1400	1450	1500	1550	1600
$\Theta, ^\circ C$	0,89	0,89	0,895	0,895	0,896	0,896

t, c	250	300	350	400	450	500	550	600
$\Theta, ^\circ C$	0,40	0,564	0,637	0,667	0,69	0,750	0,799	0,81
t, c	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
$\Theta, ^\circ C$	0,93	0,939	0,949	0,95	0,96	0,969	0,976	0,979
t, c	1650	1700	1750	1800	1850			
$\Theta, ^\circ C$	0,896	0,897	0,898	1	1			

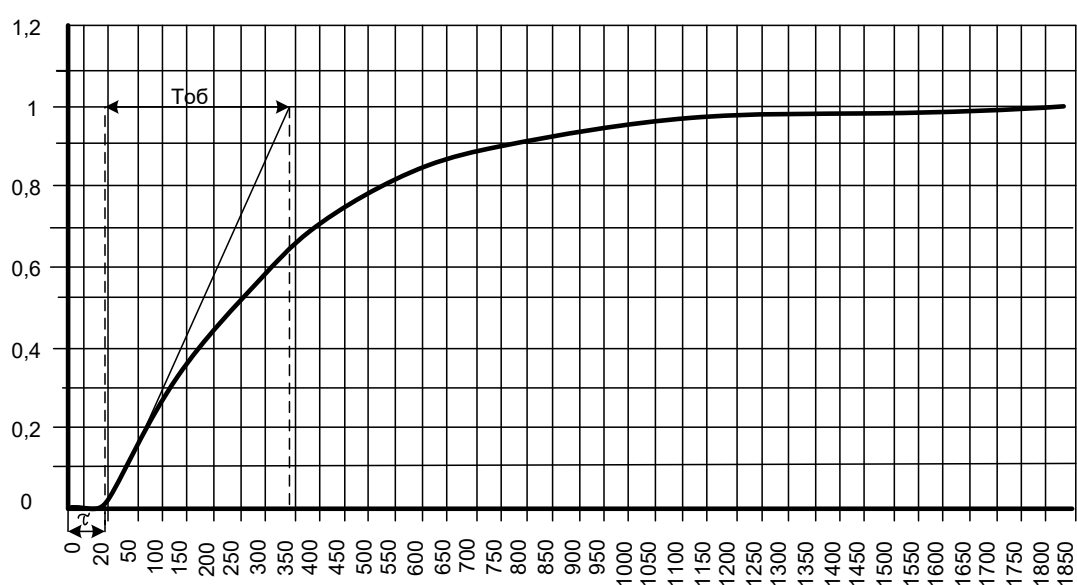


Рис. 3.1. Розгінна нормована характеристика об'єкта керування

Температурний канал метантенка описується як ланка чистого запізнення:

$$W(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-s\tau_0}. \quad (3.3)$$

Визначимо передатну функцію об'єкту керування:

$$W_{iO}(s) = \frac{0.02}{320 * s + 1} e^{-s20} \quad (3.4)$$

Дослідження динамічних характеристик об'єктів керування дозволяє визначити оптимальний алгоритм керування на етапі проектування. Це досягається аналізом співвідношення між сталою часу та часом запізнення об'єкта. Якщо $\tau / T < 0.2$, рекомендується застосовувати позиційний алгоритм керування. У випадку, коли $\tau / T > 0.2$, доцільно використовувати лінійний алгоритм, а при значенні $\tau / T = 0.2$ найкраще підходить імпульсний алгоритм. У нашому випадку, оскільки $\tau / T < 0.2$, було обрано позиційний алгоритм керування.

3.2. Оцінка ефективності використання метану в біогазовій сировині з використанням нейромереж

Актуальність розвитку біогазової індустрії, викликана світовим трендом на відновлювану енергетику, вимагає пошуку нових шляхів максимізації виходу метану під час анаеробного розкладання. Традиційне математичне моделювання часто пасує перед складною динамікою мікробної активності та мінливістю складу біомаси. Рішенням цієї проблеми є використання інтелектуальних систем прогнозування. Дана праця присвячена застосуванню методології машинного навчання для оцінки ефективності генерації метану.

Для визначення найкращих прогностичних властивостей було проаналізовано низку алгоритмів: штучні нейромережі (ANN), випадкові ліси (RF) та алгоритми еволюційної оптимізації. Також розглянуто перспективу поєднання ML-моделей із системами онлайн-моніторингу для автоматичного

коригування технологічного процесу та запобігання аварійним режимам. Розподіл даних для побудови моделей складався з навчального (70%), валідаційного (15%) та тестового (15%) наборів, а глибина архітектури нейромереж змінювалася від 10 до 20 шарів.

Первинну інформацію було вилучено з файлу *Summary of result.xls*, фрагментарне відображення якого містить рис. 3.2. База містить 83 унікальні спостереження за параметрами сировини, розділених на 5 вхідних та 6 вихідних змінних. Компонування та специфікацію метрик файлу систематизовано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Вхідні та вихідні змінні для дослідження ферментації силосу.

Назва	Позначення	Од. виміру
Вхідні дані		[без одиниці вимірювання]
1. Тип силосу	SILA	[без одиниці вимірювання]
2. pH	PH	
3. Провідність	COND	[мСм/см]
4. Час ферментації	TIME	
5. Суха речовина	DM	[дні]
6. Суха органічна речовина	ODM	[%]
Вихідні дані		[% сухої води]
Свіжа маса		
Накопичений метан		[м3/т сухої води]
Накопичений біогаз		
Суха речовина		[м3/т сухої води]
Накопичений метан		
Накопичений біогаз		[м3/т сухої води]
Органічна суха речовина		
Накопичений метан		[м3/т сухої води]
Накопичений біогаз		

Процес моделювання реалізовано в середовищі MATLAB із використанням спеціалізованого інструментарію нейронних мереж (Neural Network Toolbox). Під час проведення експериментів навчання нейромереж здійснювалося на основі трьох алгоритмів: Левенберга-Марквардта (LM), байєсівської регуляризації (BR) та масштабованого спряженого градієнта (SCG) (рис. 3.3).

Target data						Output			
Тип теста	pH	Проводимість [мСм/см]	Час ферментації [дні]	Суша речовина [%]	Органічна суша речовина [% с.р.]	Свіжа маса		Сухе вещество	
SILA	PH	COND	TIME	DM	ODM	Кумулятивний метан [м3/т д.м.]	Накопичувальний біогаз [м3/т д.м.]	Кумулятивний метан [м3/т д.м.]	Накопичувальний біогаз [м3/т д.м.]
Кукурудзяний силос з Дялтиця	4.00	1.80	26	38.44	96.62	151.75	305.75	432.70	750.25
Кукурудзяний силос	4.02	0.58	14	34.59	95.97	124.75	240.16	369.32	711.01
Кукурудзяний силос	4.02	0.58	14	33.25	95.78	115.50	220.09	341.94	651.49
Кукурудзяний силос	4.02	0.58	14	32.97	95.59	116.05	221.98	343.56	657.19
Буряковий жом нагорі купи	3.48	0.52	14	14.08	93.07	52.43	105.21	362.16	726.75
Буряковий жом нагорі купи	3.48	0.52	14	14.21	93.09	54.01	107.73	373.10	744.17
Буряковий жом нагорі купи	3.48	0.52	14	15.14	92.38	60.71	121.06	419.40	836.22
Буряковий жом нагорі купи	3.46	0.57	14	18.19	91.92	62.15	124.49	334.21	669.46
Буряковий жом нагорі купи	3.46	0.57	14	18.94	90.36	63.01	125.48	336.85	674.52
Буряковий жом нагорі купи	3.46	0.57	14	18.66	91.37	63.07	126.70	339.16	681.36
Кукурудзяний силос	4.04	0.77	34	36.00	95.41	120.72	216.56	333.66	598.90
Кукурудзяний силос	4.04	0.77	34	36.58	95.33	120.96	239.16	334.53	661.40
Кукурудзяний силос	4.04	0.77	34	35.92		117.85	210.20	325.91	581.33
Пшенична солома S401	7.53	13.37	37	88.60	95.85	210.67	407.43	329.63	637.51
Пшенична солома S402	7.51	14.69	37	87.52	96.25	114.74	218.27	179.54	341.47
Пшенична солома S403	7.60	12.60	37	87.98	94.98	117.56	225.91	183.94	353.40
Пшенична солома S41	7.58	15.87	37	87.25	94.98	132.51	255.81	221.33	427.27
Пшенична солома S42	7.54	14.86	37	86.89	95.25	140.50	271.67	234.68	453.77
Пшенична солома S43	7.53	12.77	37	87.02	95.68	125.98	242.68	210.43	405.35
Гній великої рогатої худоби	7.78	24.90	29	15.72	87.52	33.22	49.79	208.41	312.34
Гній великої рогатої худоби	7.81	24.10	29	16.09	87.50	30.68	54.65	192.46	342.83
Гній великої рогатої худоби	7.80	24.80	29	16.00	87.20	32.01	48.15	200.82	302.07

Рис. 3.2. Фрагмент датасету для навчання нейромережі

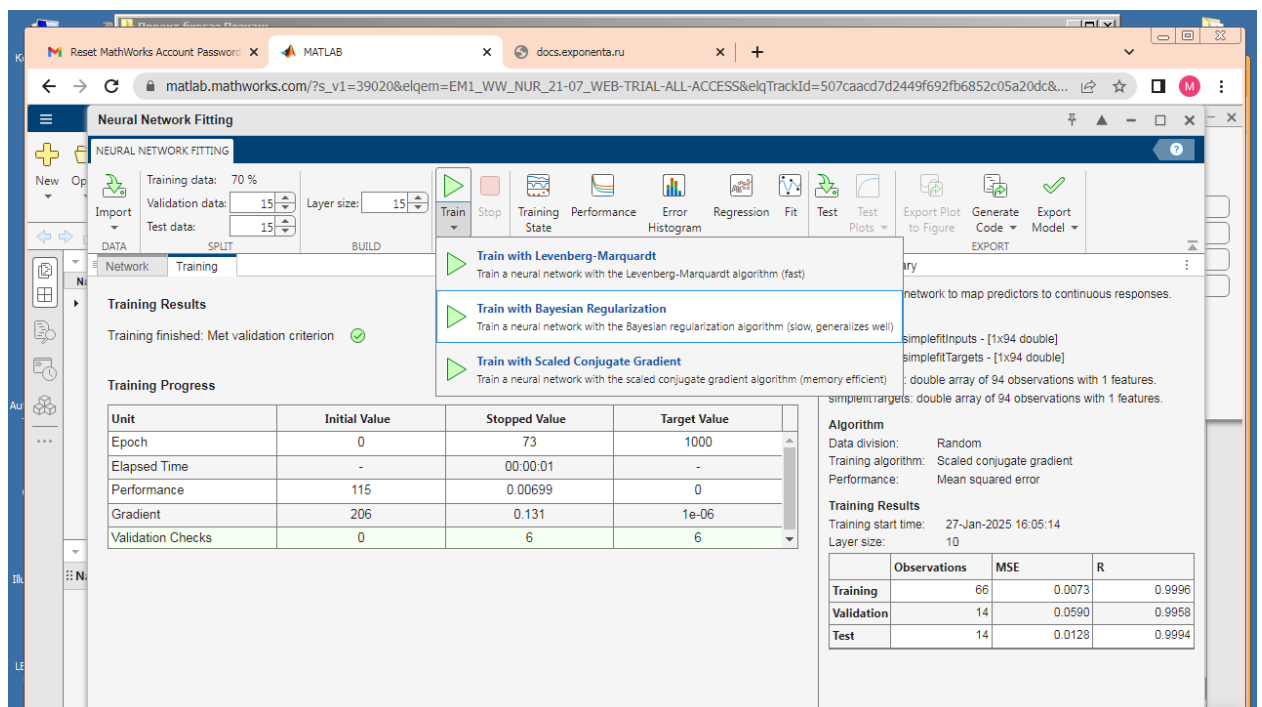


Рис. 3.3. Інтерфейс програми Matlab для розв'язання задачі навчання нейронної мережі (на прикладі методу SCG).

На рис. 3.4 представлено динаміку навчання нейронної мережі на основі алгоритму LM. По осі абсцис (X) відкладено епохи навчання, а по осі ординат (Y) — середньоквадратичну помилку (MSE). На стартових етапах зафіксовано стрімке падіння похибки, що підтверджує високу швидкість збіжності, притаманну методу Левенберга-Марквардта. Приблизно до 50-ї епохи значення MSE стабілізується на позначці $\sim 0,5\%$, свідчаючи про вихід моделі на локальний мінімум. Водночас ускладнення архітектури шляхом збільшення кількості шарів до 20 призводить до погіршення точності (помилка зростає до $10,58\%$).

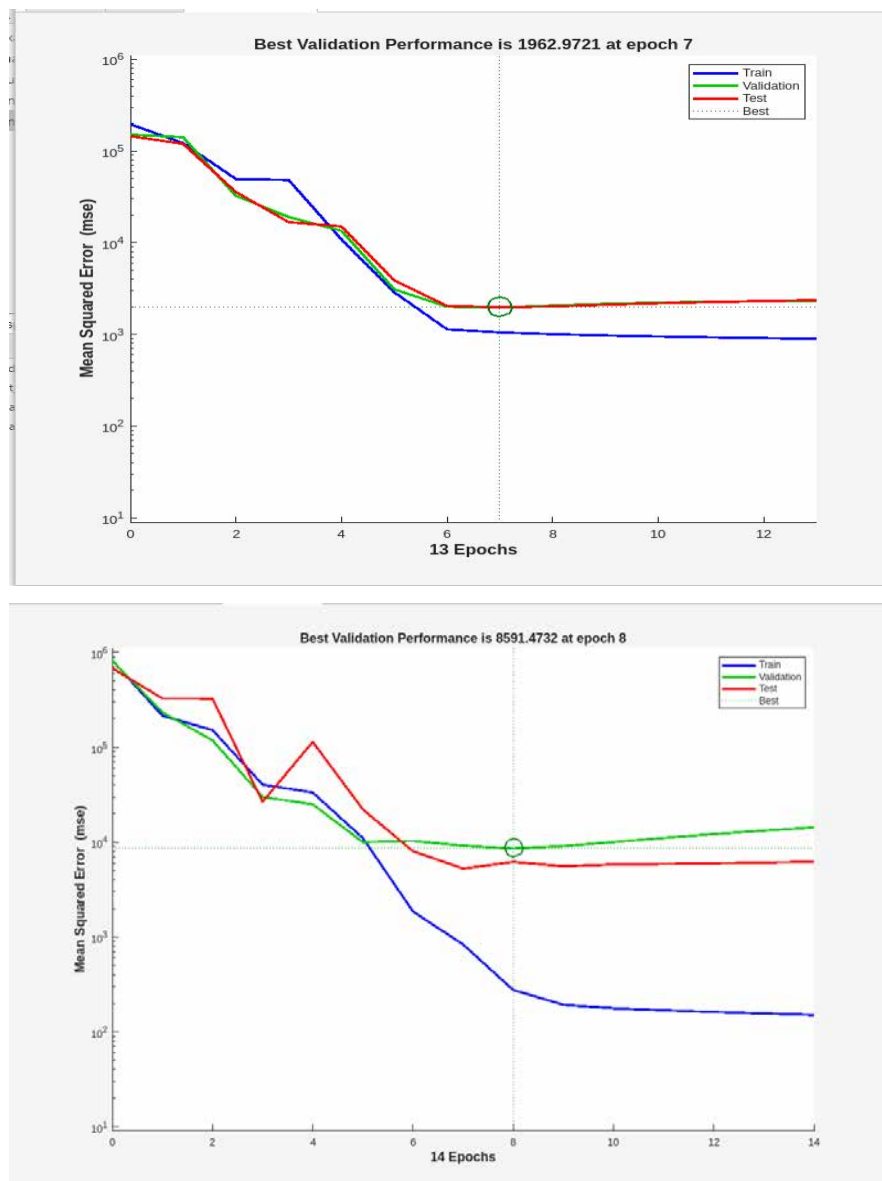


Рис. 3.4. Навчання нейронних мереж з використанням алгоритмів LM (a), BR (b)

The screenshot displays the MATLAB R2023a environment with the following components:

- Top Toolbar:** Includes tabs for HOME, PLOTS, APPS, and IMPORT. The IMPORT tab is active, showing options like 'New Variable', 'Open', 'Neural Network Start (instant)', 'Layout', 'Set Path', 'Add-Ons', 'Parallel', 'Help', 'Community', 'Request Support', 'Learn MATLAB', and 'Resources'.
- File Explorer (Left):** Shows the 'MATLAB Drive' with a folder named 'Examples' containing files like 'matlab.mat', 'Summary of results (1).xlsx', 'untitled.m', and 'untitled.mlx'.
- Variable Browser (Bottom Left):** Displays a table of variables:

Name	Value	Size	Class
Input_data	83x5 double	83x5	double
Output_data	83x6 double	83x6	double
SummaryOfResults_1_32	83x6 table	83x6	table
SummaryOfResults_2_32	83x5 table	83x5	table
- Script Editor (Center):** Contains a MATLAB script for importing data from a spreadsheet. The script includes comments and code for setting import options, specifying sheet and range, and defining variable names and types.


```

1 % Script for importing data from the following spreadsheet
2 %
3 %
4 % Workbook: /MATLAB Drive/Summary of results (1)
5 % Worksheet: Arkus1
6 %
7 % Auto-generated by MATLAB on 24-Jan-2025 11:21:13
8
9 %% Set up the Import Options and import the data
10 opts = spreadsheetImportOptions("h","variables", 1)
11
12 % Specify sheet and range
13 opts.Sheet = "Arkus1";
14 opts.DataRange = "A6:A44";
15
16 % Specify column names and types
17 opts.VariableNames = "lp";
18 opts.VariableTypes = "string";
19
20 % Specify variable properties
21 opts = setvaropts(opts, "lp", "WhitespaceRule", "p");
22 opts = setvaropts(opts, "lp", "EmptyfieldRule", "p");
23
24
25
26

```
- Command Window (Bottom Right):** Shows the execution of the command `sim(results_1_2, NetworkK, [7,51;14,69;17;87,52;96,25])`, resulting in a 1x5 array of values:


```

ans =
    124.2605
    233.8400
    200.6494
    377.4425
    205.1624
    366.8097

```
- Neural Network Fitting (Right):** A floating window titled 'Neural Network Fitting' showing a table of results for 'Var6':

Number	Number
61	57.4187
62	2.5362
63	1.8102
64	2.25
65	194.1752
66	194.0613
67	194.8955
68	5.2503
69	5.4909
70	5.3072
71	25.8818
72	26.763
73	26.196
74	18.6651
75	18.6878

The screenshot displays the MATLAB R2019a desktop environment. The top toolbar includes tabs for HOME, PLOTS, APPS, VARIABLE, and VIEW. The VARIABLE tab is selected, showing a workspace table and a command window. The workspace table lists variables: SummaryOfResults_1_52 (2x6 double), SummaryOfResults_2_52 (2x5 double), ans (109.8298x183.940... 6x1 double), and results (1x2 struct). The command window shows the command: >> sim(results.net, [7.85;15.84;18; 32.38; 95.01]) and the output: ans = 109.8298 183.9403 370.6648 645.7163 400.9567 689.1769. A 'Neural Network Fitting' dialog box is open in the foreground.

Рис. 3.5. Результати тестування нейронної мережі

Згідно з отриманими даними, алгоритм байєсівської регуляризації (BR) демонструє найкращі результати за критеріями точності та стабільності прогнозів, випереджаючи методи Левенберга-Марквардта (LM) та масштабованого спряженого градієнта (SCG), що є критично важливим для гетерогенних даних. Водночас поєднання інструментів ML із технологіями багатокритеріального оцінювання, як-от методологія поверхні відгуку (RSM), відкриває нові можливості для максимізації надійності моделювання.

Ця робота робить вагомий внесок у цифровізацію біогазової індустрії, пропонуючи готову базу для інтеграції машинного навчання у промислові процеси. Практична реалізація результатів сприятиме інтенсифікації виходу метану, зниженню деструктивного впливу на клімат та загальному зміцненню засад сталого розвитку. Перспективним напрямком подальшої роботи є створення гнучких моделей штучного інтелекту, здатних функціонувати в режимі реального часу та адаптуватися до різноманітних субстратів.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

4.1. Вибір технічних засобів

4.1.1. Розрахунок та вибір регулятора

Для управління клапано за допомогою виконавчого механізму ми використаємо контролер ПЛК200 із розрядністю 16 біт. (див. рис. 4.1).



Рис. 4.1. Контролер ПЛК200

У системі автоматичного керування присутні регулятор та об'єкт яким він керує, і вибір оптимального закону регулювання вагомо впливає на динамічні характеристики об'єкту.

За результатами моделювання системи автоматичного регулювання температури біореактора у програмному середовищі MatLab було визначено, що за ефективністю найкращим є пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання, оскільки характеризується об'єкт значною інерційністю. Для автоматизації такого об'єкта необхідно застосовувати неперервний ПІД-регулятор, який відповідає наступному співвідношенню:

$$W_{\text{ПД}} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s, \quad (4.1)$$

де K_p – коефіцієнт передачі регулятора;

K_i – коефіцієнт інтегрування (час ізодрому) регулятора;

K_d – коефіцієнт диференціювання регулятора.

У динамічному контексті для реалізації ПД-алгоритму керування використовується комплекс технічних засобів, що має три ланки: одну безінерційну та дві інерційні ланки з передатними функціями:

$$W_{PID}(s) = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{s}$$

Коефіцієнти розраховані в середовищі MatLab для визначення оптимальних параметрів налаштування ПД-регулятора.

$$K_p = 0,25; K_i = 0.0000001; K_d = 39.$$

Тоді передатна функція матиме наступний вид:

$$W_{PID}(s) = \frac{39s^2 + 0,25s + 0,000001}{s}$$

Перевагою ПД-алгоритму є висока точність та швидке регулювання, що робить його ефективним для об'єктів без властивостей самовирівнювання та тих, які піддаються різним збуренням. Для покращення можливостей підключення було обрано модуль вводу сигналів від тензодатчиків MB110-1ТД..



Рис.4.2. MB110-1ТД. Модуль вводу сигналів тензодатчиків

4.1.2. Вибір первинного перетворювача

Процес вибору вимірювального перетворювача поділяють на два основні етапи. На першому етапі визначають тип перетворювача відповідно до контрольованого параметра об'єкта управління та його умов експлуатації. На другому етапі, після вибору всіх елементів регулятора з каталогів, здійснюють підбір типорозміру вимірювального перетворювача.

При виборі датчика слід враховувати кілька ключових факторів. На самперед, діапазон вимірювання датчика повинен відповідати змінам контрольованого параметра X і бути максимально наближеним до цього діапазону. Важливо також врахувати перевантажувальну здатність датчика та його сумісність із вибраним електронним пристроєм управління регулятором. Крім цього, слід звернути увагу на швидкодію та інерційність вимірювального перетворювача, що визначається його сталою часу T .

Вимоги до датчиків:

1. Забезпечення лінійної та однозначної статичної характеристики, з допустимою похибкою нелінійності в межах 0,1...3%.
2. Підвищена чутливість для точного виявлення змін.
3. Стійкість параметрів у тривалому часовому проміжку.
4. Висока швидкодія, що дозволяє датчику оперативно реагувати на зміни.
5. Стійкість до впливу хімічних речовин як із контрольованого та зовнішнього середовища; це особливо важливо для первинних перетворювачів, які можуть потребувати захисного корпусу.
6. Мінімальний вплив на параметр, який контролюється.
7. Зручність у монтажі та подальшому обслуговуванні.

При виборі датчика температури необхідно враховувати діапазон температур, потрібний для ефективної роботи системи регулювання. Наприклад, для регулювання температури субстрату в метантенку в межах (30...55)°C можна обрати мідний термометр опору ТСМ 50, що має діапазон вимірювання від -50 до 140°C (згідно з таблицею 4.1).

Таблиця 4.1.

Характеристика датчика температури TCM 50

Тип	Градуювання	Діапазон вимірювання °C	Показник теплової інерції
TCM 50	23 гр.(R ₀ = 50 Ом)	-40...+140	14с.

Аби при вимірюванні температури датчик(перетворювач) не спотворював результати та не створював неприпустиму динамічну похибку, його постійна часу (TCE) має бути більшою за постійну часу об'єкта управління (ТОУ), збільшену в десять разів. У цьому випадку, оскільки ТОУ становить 320 секунд, максимальна допустима постійна часу для вимірювального перетворювача не повинна перевищувати 32 секунди (ТОУ/10). Згідно з даними таблиці 4.1, постійна часу датчика температури TCM 50 складає 15 секунд.

Зовнішній вигляд термометра опору TCM 50 зображений на рисунку 4.4, а його статична характеристика – на рисунку 4.5.

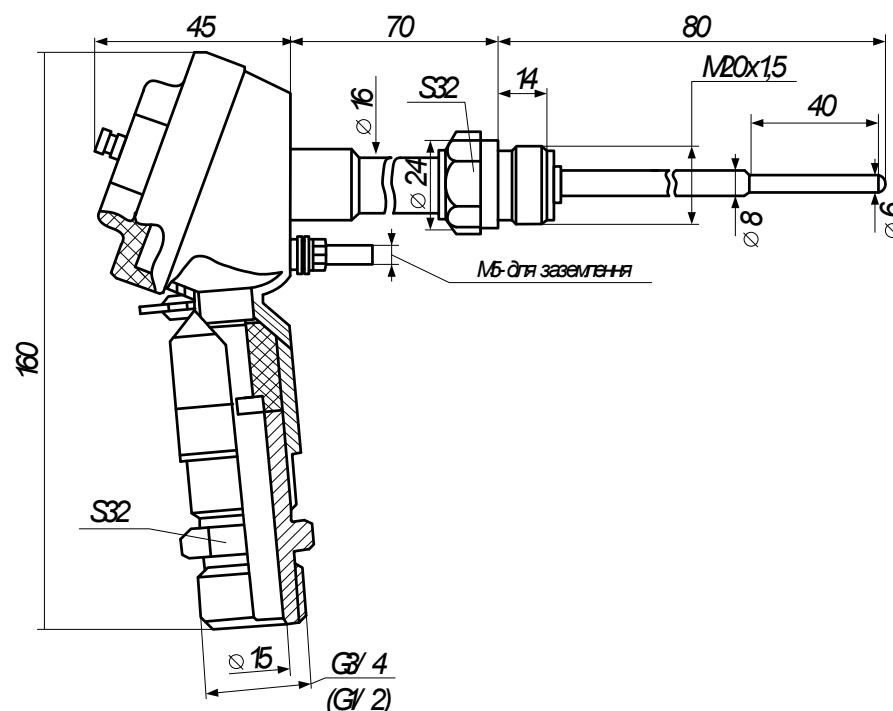


Рис. 4.4. Загальний вигляд датчика TCM 50

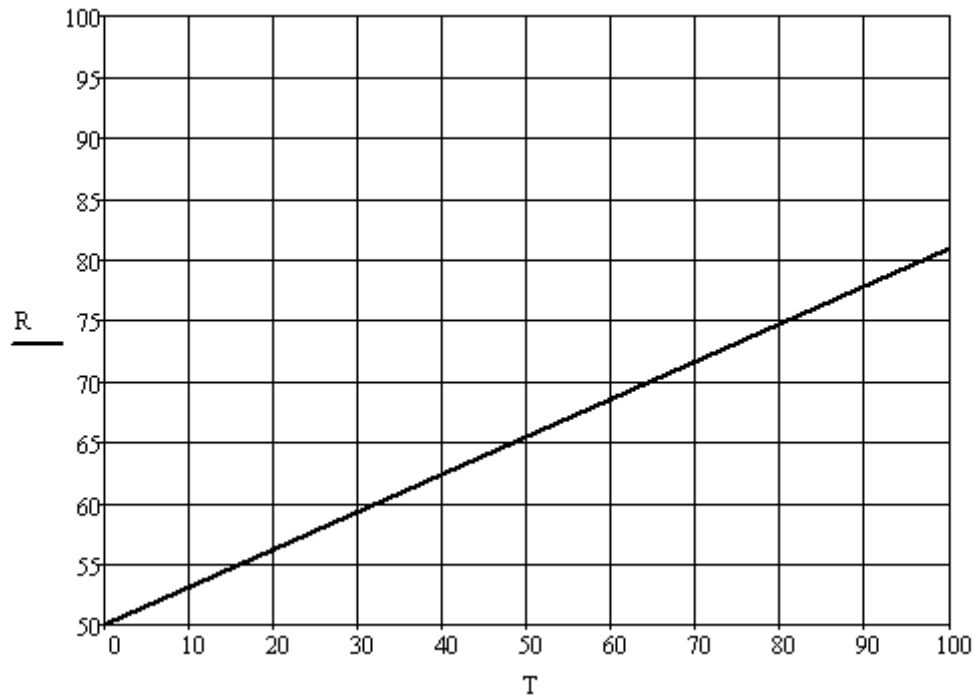


Рис. 4.5. Статична характеристика датчика TCM 50

Передатна функція термометрів опору відображає їх інерційну поведінку і має наступну форму:

$$W(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1} \quad (4.4)$$

Передатну функцію термометра опору типу TCM 50 знаходимо наступним чином:

$$m_d \cdot C_d \frac{d\Delta\Theta_d}{dt} = \alpha_d \cdot F_d \cdot (\Delta\Theta_{не} - \Delta\Theta_d), \quad (4.5)$$

де m_d – маса перетворювача, кг;

C_d – теплоємність перетворювача, кДж/кг °С;

α_d – коефіцієнт теплопередачі, кДж/кг °С;

F – поверхня теплообміну, м²;

θ_d – температура перетворювача, °С;

$\theta_{не}$ – температура субстрату, °С.

$$R_d = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\Theta_d) \quad (4.6)$$

де R_0 – опір перетворювача при 0°C , Ом;

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

Записавши рівняння (4.6) у відхиленнях одержимо:

$$\Delta R_\partial = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta \Theta_\partial, \quad (4.7)$$

$$\Delta \Theta_\partial = \frac{\Delta R_\partial}{\alpha \cdot R_0}. \quad (4.8)$$

Підставивши рівняння (4.5) в рівняння (4.6) отримаємо:

$$\frac{m_\partial \cdot C_\partial}{\alpha_\partial \cdot F_\partial} \cdot \frac{d\Delta R}{dt} + \Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta \Theta_\partial. \quad (4.9)$$

Канонічна форма рівняння має вид:

$$T \cdot \frac{d\Delta R}{dt} + \Delta R = k \cdot \Delta \Theta_\partial, \quad (4.10)$$

де

$$T = \frac{m_\partial \cdot C_\partial}{\alpha_\partial \cdot F_\partial}; \quad k = \alpha \cdot R_0. \quad (4.11)$$

Для перетворювача температури ТСМ 50:

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

$T = 15\text{с}$ – визначили як показник теплової інерції. Тоді передатна функція має вигляд:

$$W_\partial(s) = \frac{0.21}{15 \cdot s + 1}. \quad (4.12)$$

4.1.3. Розрахунок виконавчого механізму

Для вибору виконавчого механізму потрібно визначити точну величину обертального моменту, що необхідний для зрушення плунжера регулюючого органа (РО). Це потрібно зробити з використанням безумовно надійної формули, яка надає вичерпну залежність між цими параметрами.

$$M_{BM} = 2 \cdot (M_p + M_M), \quad (4.22)$$

де M_p – реактивний момент, обумовлений намаганням потоку речовини закрити заслінку;

M_M – момент опору в опорах.

Для розрахунку обертального моменту (ВМ) необхідно врахувати реактивний момент M_p та момент опору в опорах M_M . Для цього використовуються відповідні формули, які дають змогу отримати необхідні значення:

$$M_p = 0.07 \cdot \Delta P_{po_{max}} \cdot D_y^3, \quad (4.23)$$

$$M_M = 0.75 \cdot \Delta P_{po_{min}} \cdot D_y^2 \cdot \lambda, \quad (4.24)$$

де $\Delta P_{po_{max}}$ – максимальний перепад тиску на РО;

$\Delta P_{po_{min}}$ – мінімальний перепад тиску на РО;

λ – коефіцієнт тертя в опорах РО;

D_y – діаметр РО.

Момент на валу виконавчого механізму, має бути не меншим за момент для відкриття заслінки. Для цього ми використаємо умову, яка описана як умова 4.0.

$$M_H \geq M_{\text{вм}}. \quad (4.25)$$

Визначення обертального моменту (ВМ) полягає в наступному:

1. Розраховуємо реактивний момент M_p і момент опору в опорах M_M :

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

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

2. Момент на виконавчому механізмі буде дорівнювати:

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

3. Перевіряємо задоволеність електроприводом

$$M_H \geq M_{\text{вм}},$$

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

Вибираємо електричний виконавчий механізм «Regada ST 0.1» (рис. 4.11), у якого $T_{вм} = 10$ с (табл. 4.4), а динамічна та статична характеристики представлені на рис. 4.12 та 4.13.

Таким чином, передатна функція виконавчого механізму має форму:

$$W_{вм} = \frac{K_{вм}}{10s} = \frac{1}{10s}. \quad (4.26)$$



Рис 4.11. Виконавчий механізм «Regada ST 0.1»

Таблиця 4.2.

Технічні характеристики виконавчого механізму

Робочий хід, мм	32
Час повного закриття/відкриття, с	9
Зусилля на штокові, Н·м	6.3
Режим роботи	повторно-короткочасний
Напруга живлення	380 В, 50 Гц
Споживана потужність, Вт	14
Вага, кг	8,2
Умови експлуатації	
Навколишня температура, °C	-20..+50
Відносна волога, %	4..100
Ступінь захисту	IP67

За допомогою передатної функції будемо динамічну характеристику:

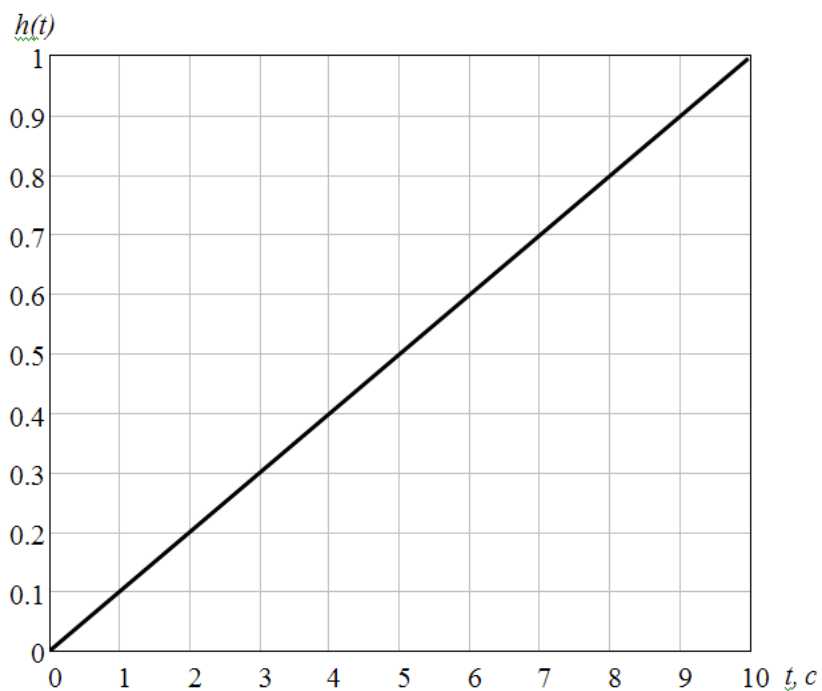


Рис. 4.12. Динамічна характеристика ВМ

На рис. 4.13 зображено статичну характеристику виконавчого механізму.

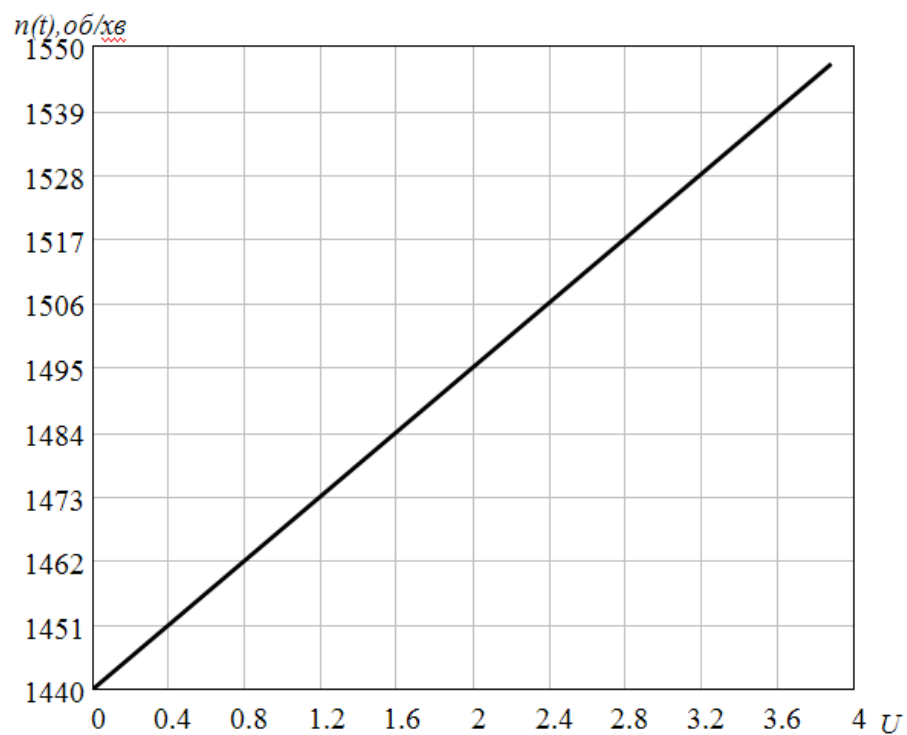


Рис. 4.13. Статична характеристика ВМ

4.1.4 Розрахунок та вибір регулюючого клапану теплопроводу

Таблиця 4.3.

Вихідні дані

Максимальна витрата води через клапан	$Q_{\max} = 2300$ кг/год;
Мінімальна витрата води через клапан	$Q_{\min} = 2000$ кг/год;
Тиск води перед клапаном	$p_1 = 300$ кН/м ² ;
Тиск води після клапана	$p_2 = 150$ кН/м ² ;
Густина води	$\rho = 0,939$ кг/м ³ ;
Діаметр трубопроводу	$D_{\text{тр}} = 150$ мм
Тип затвору клапану	стержньово профільний
Вид конструктивної характеристики	лінійна

Порядок розрахунку

1. Знаходимо коефіцієнт продуктивності клапана.

Так як тиск пари після клапана менше половини тиску перед клапаном, то скористаємося формулою:

$$C = \frac{Q}{1,75 \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho}}, \quad (4.26)$$

де C – коефіцієнт продуктивності клапана, м³/год;

Q – витрата води через клапан, кг/год;

p_1 – тиск води перед клапаном, кН/м²;

ρ – густина пари, кг/м³.

$$C_1 = \frac{Q_{\max}}{1,75 \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho}} = \frac{2300}{1,75 \cdot \sqrt{300 \cdot 0,94}} = \frac{2300}{26,1} = 78,26 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$C_2 = \frac{Q_{\min}}{1,75 \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho}} = \frac{2000}{1,75 \cdot \sqrt{300 \cdot 0,94}} = \frac{2000}{26,1} = 76,63 \text{ м}^3/\text{год}$$

2. Користуючись довідковою таблицею 5.1 вибираємо регулюючий клапан із врахуванням числових значень C_1 і C_2 , визначаючи при цьому табличне значення коефіцієнта

$$C_{\text{таб}} \geq 1,2 \cdot C, \quad (4.27)$$

де $C_{\text{таб}}$ – табличне значення коефіцієнта продуктивності клапана;

C – коефіцієнт продуктивності клапана, $\text{м}^3/\text{год}$.

Таблиця 4.4

Вибір діаметру по типу затвору (плунжера)

Діаметр умовного проходу D_y , мм	Діаметр прохідного отвору d , мм	Тип затвору (плунжера)			
		Стержневий профільований		Циліндричний пустотілий з профільними вікнами	Тарілчастий
		Конструктивна характеристика клапана			
		Лінійна	Логарифмічна	Параболічна	Лінійна
		Коефіцієнт продуктивності C			
25	15	8	-	3,5	8
	20	11	-	6,5	12
	25	14	-	10	15
50	32	30	-	—	—
	40	41	35	26	41
	50	50	42,5	40	52
80	70	79	67	87	82
	80	98	80	100	103
100	100	175	165	160	175
150	125	245	190	250	—
	150	350	270	360	350
200	200	650	570	640	650
250	250	1000	900	1000	1000
300	300	1400	1200	1400	1400

При коефіцієнті C_1 з максимальною витратою через клапан

$$C_{\text{таб}} \geq 1.2 * C_1 = 175 \geq 105,6$$

Згідно з довідковою таблицею 5.1 обираємо діаметри умовного проходу і прохідного отвору:

$$D_y = 100 \text{ мм}, d = 100 \text{ мм.}$$

При коефіцієнті C_2 з мінімальною витратою через клапан

$$C_{\text{таб}} \geq 1.2 * C_2 = 100 \geq 92$$

Згідно з довідковою таблицею 5.1 вибираємо діаметри умовного проходу і прохідного отвору:

$$D_y = 80 \text{ мм}, d = 80 \text{ мм.}$$

3. Перевіряємо вибраний клапан на діапазон регулювання

$$D = \alpha_1 - \alpha_2, \text{ де} \quad (4.27)$$

D – діапазон регулювання;

α_1 – степінь відкриття клапана при найбільшій витраті;

α_2 – степінь відкриття клапана при мінімальній витраті.

$$\alpha = \frac{C}{C_{\text{таб}}} * 100\%, \text{ де} \quad (4.28)$$

α – степінь відкриття клапана, %;

$C_{\text{таб}}$ – табличне значення коефіцієнта продуктивності клапана;

C – коефіцієнт продуктивності клапана, м³/год.

$$\alpha_1 = \frac{C_1}{C_{\text{таб}}} * 100\% = \frac{82.12}{100} * 100\% = 82.12\%$$

$$\alpha_2 = \frac{C_2}{C_{\text{таб}}} * 100\% = \frac{76.93}{100} * 100\% = 76.93\%$$

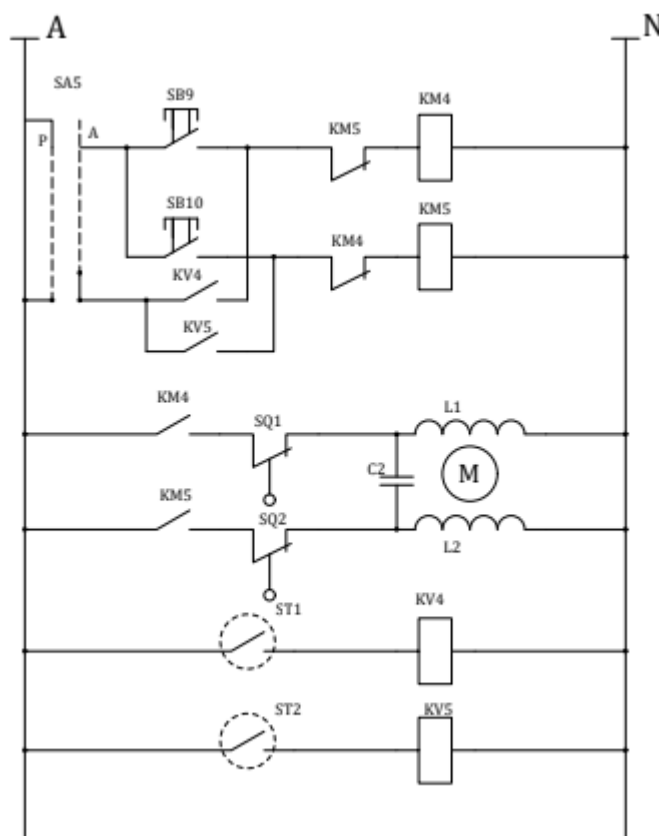
$$D = \alpha_1 - \alpha_2 = 82.12 - 76.93 = 5.19\%$$

Висновок: так як діапазон регулювання не перевищує 80%, то розрахунок регулюючого клапану є вірним.

4.2 Розробка електричної принципової схеми

Принципова електрична схема це документом, який детально описує всі електричні компоненти, їх з'єднання та надає чітке уявлення про принцип

Принцип роботи схеми полягає в наступному.



У режимі ручного керування виконується управління сервоприводом, який регулює клапан гарячої води, підключеного до водяного котла (рис. 1.8). При переведенні перемикача SA1 в положення ручного керування, подається напруга на контакт 2 кнопки SB9 "старт". Натискання цієї кнопки спричиняє розмикання контактів в колах живлення пускачів KM1 і KM2, при цьому

замикається контакт КМ1, що подає напругу на привід клапану паропроводу і відкриває його. Якщо натискається кнопка SB2 "стоп", відбувається розмикання контактів в колі пускача КМ1, під час цього замикається контакт КМ2, що зупиняє подачу енергії на привід клапану, повертаючи його в закрите положення. Для автоматичного керування необхідно повернути перемикач SA1 в положення «Автоматичне». Коли температура осаду в метантенку досягає критичної межі Тмін, контакт датчика температури ST1 замкнеться і подасть сигнал на реле КV1. Реле замкне контакт, що дозволить подачу енергії на пускач КМ1, розмикаючи контакт в колі пускача КМ2 і забезпечуючи подачу живлення на привід клапану паропроводу, що відкриє його.

При досягненні температури осаду в метантенку допустимого максимального значення, замкнеться контакт датчика температури ST2 в колі живлення реле КV2. Замикаючий контакт реле подасть сигнал на пускач КМ2, розмикаючи контакт у колі пускача КМ2. Це забезпечить подачу енергії на привід клапану паропроводу, що призведе до його закриття, знижуючи температуру до допустимого рівня.

Елементи принципової електричної схеми наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5.

Елементи принципової електричної схеми

Позиц. познач.	Найменування	Кількість
SB9	Кнопка «Пуск»	1
SB10	Кнопка «Стоп»	1
KV1.1, KM1.1, KM2.1	Замикаючі контакти	3
KV2.1, KM1.2, KM2.2	Розмикаючі контакти	3
SQ1, SQ2,	Кінцевий вимикач	2
KM1, KM2,	Магнітний пускач	2
KV1, KV2	Реле	2
ST1.1, ST2.1	Датчик температури	2
L1, L2	Котушка індуктивності	2
C2	Конденсатор	1
SA1	Перемикач режиму	1

4.3 Розробка схеми з'єднань

Схема з'єднань використовується аби відобразити взаємне розташування компонентів установки або пристрою. Вона ґрунтуються на принципових електричних схемах живлення і застосовуються під час монтажу та налагодження системи. Приклади таких схем наведено на рисунках 4.15-4.17.

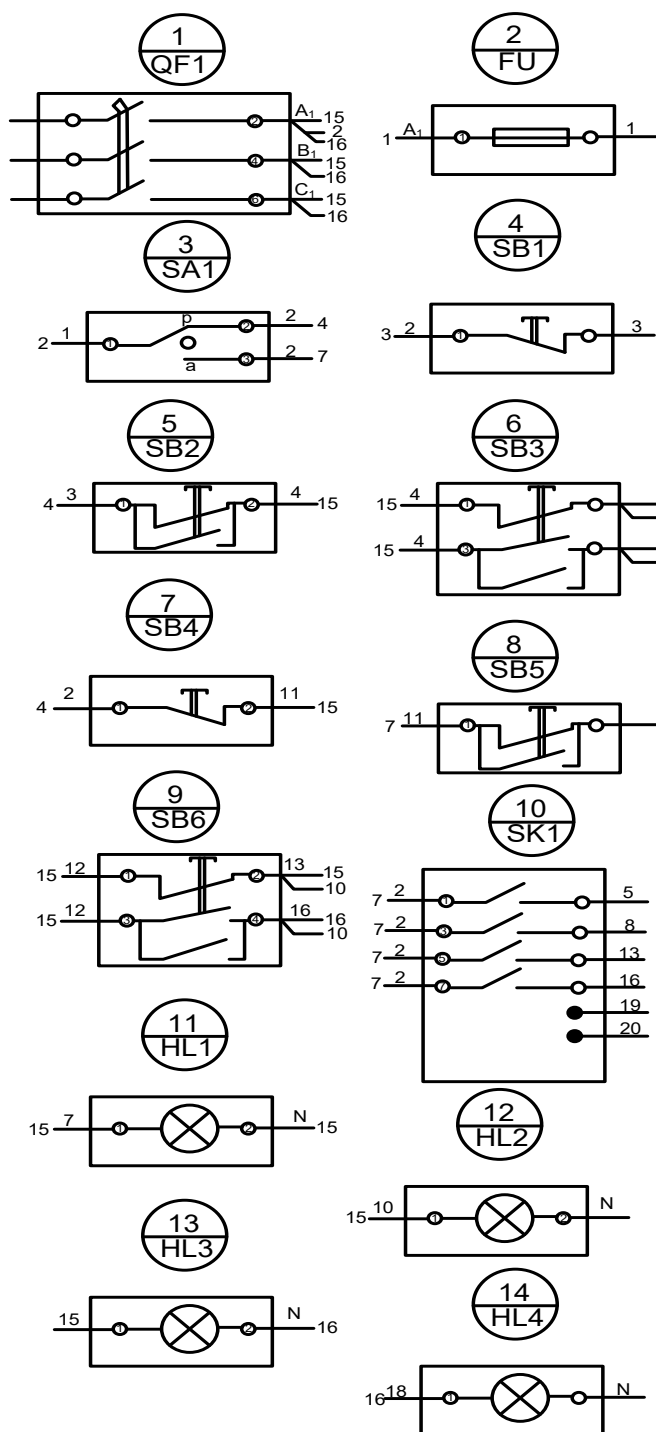


Рис. 4.15. Передня панель

При розробці схеми з'єднань важливо враховувати кілька ключових аспектів:

- Створення схем з'єднань для окремих щитів, пультів чи станцій керування.
- Повне відображення всіх типів апаратів, приладів та обладнання, які зазначені в принциповій електричній схемі.
- Збереження позначень приладів та засобів автоматизації, а також маркувань кіл, що використовуються в принципових схемах, на схемах з'єднань.

Є три методи виконання схеми з'єднань: адресний, графічний і табличний. Для адресного і графічного методів використовуються наступні принципи:

- Розгортка шафи та щита керування виконується в одній площині, де мають бути зображені тільки конструкції, на яких встановлені прилади та засоби автоматизації, враховуючи їх взаємне розташування.
- Прилади та засоби автоматизації зображуються у вигляді спрощених прямокутників ігноруючи масштаб, з півколами над ними. Порядковий номер виробу позначається цифрою над півколом (нумерація зліва направо і зверху вниз), а позначення позиції згідно з принциповою схемою — під півколом. За необхідності також можуть бути показані внутрішні схеми апаратів.
- Якщо кілька реле, розташованих в одному ряду, мають однакову схему всередині, то її показують тільки один раз. Вивідні затискачі зображують у вигляді кола з заводським маркуванням всередині.

4.4. Розробка схеми підключень та вибір щита і щитової апаратури

Схема підключень (рис. 4.18) демонструє зовнішнє з'єднання апаратів, установок, щитів, пультів тощо. Для її побудови був використаний графічний метод.

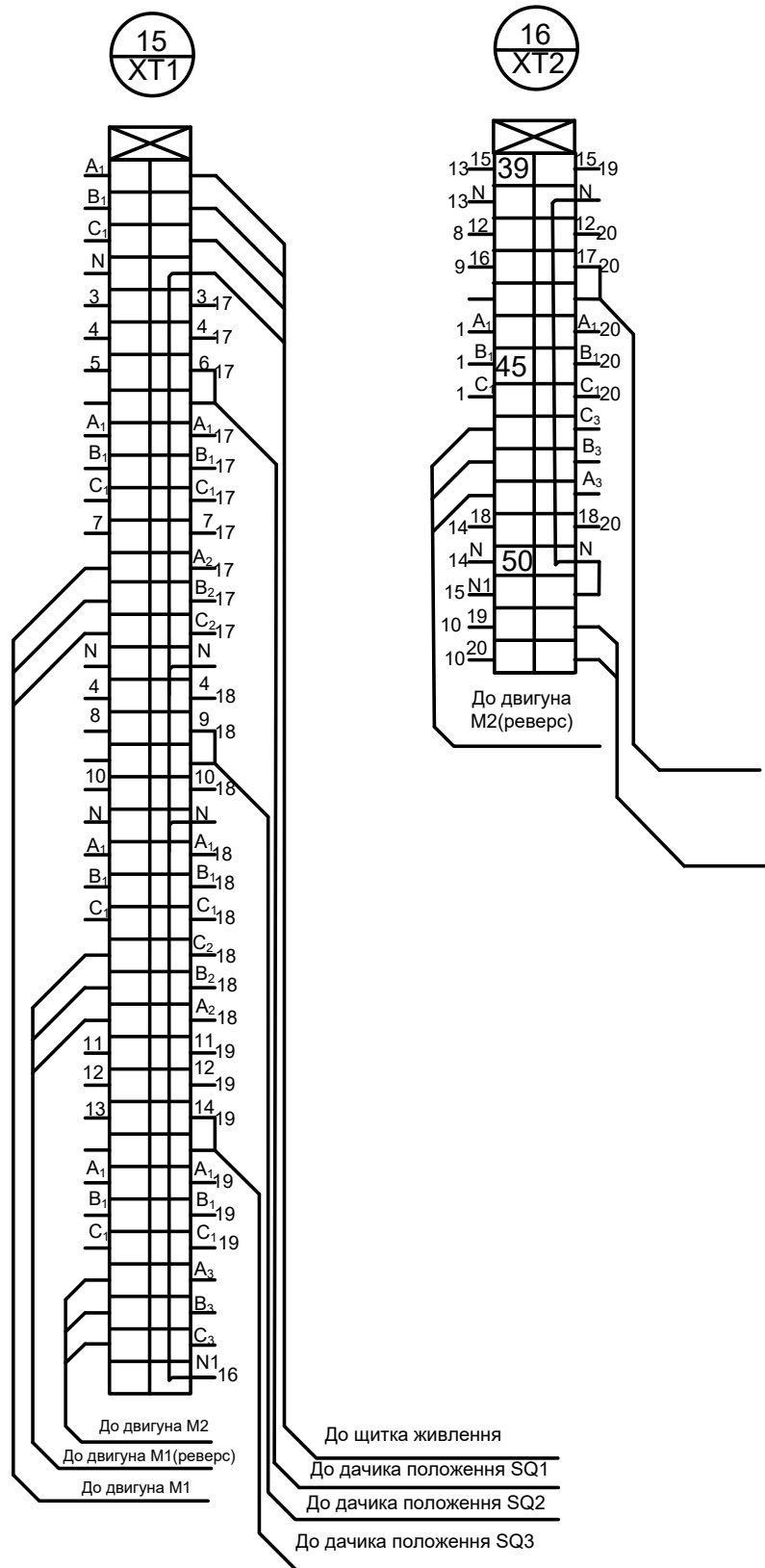


Рис. 4.16. Ліва бічна панель

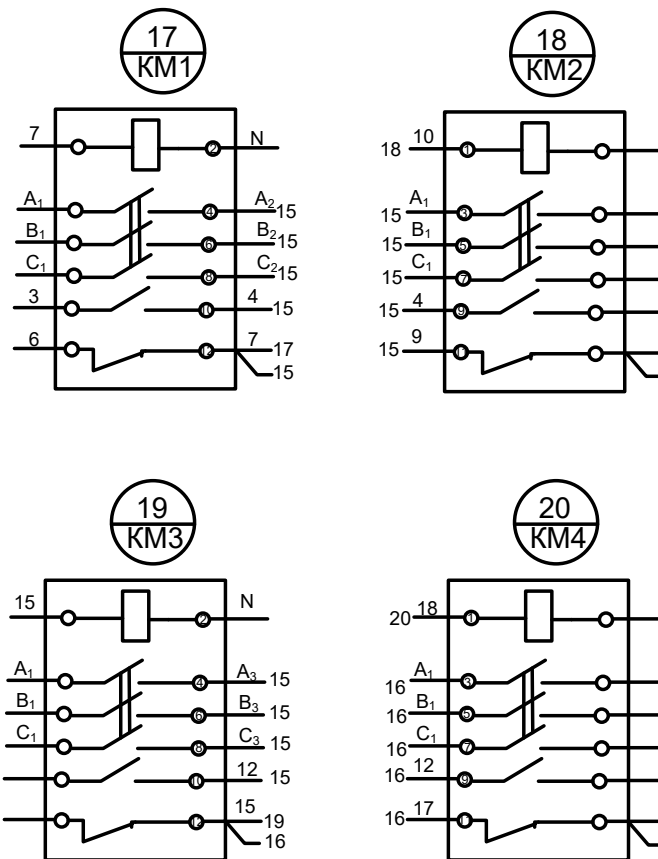


Рис. 4.17. Задня панель

Умовні графічні позначення використовуються для таких елементів:

- Відбірні пристрої та первинні перетворювачі;
- Щити, пульти та локальні пульти керування контролю сигналізації та вимірювання;
- Прилади та засоби автоматизації, що розміщені поза щитами;
- З'єднувальні та протяжні коробки, вільні коробки, електропроводки та кабелі, які прокладаються поза щитами;
- Вузли з'єднання електропроводів з приладами, апаратами та коробками;
- Забірна апаратура та елементи для з'єднання та відгалуження;
- Комутаційні затискачі, що розміщені поза щитами;
- Заземлення.

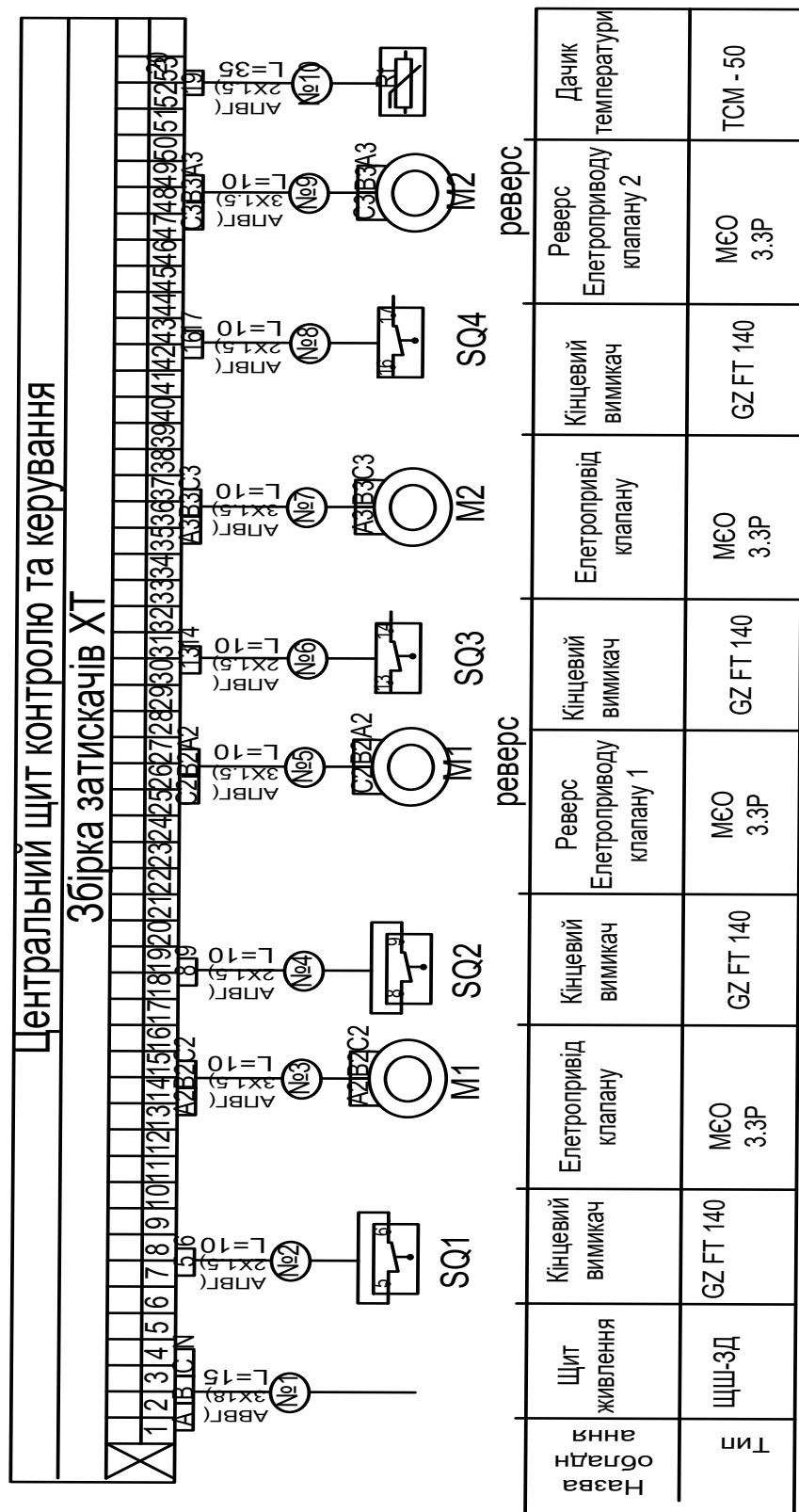


Рис. 4.18. Схема електричних підключень

Щити і пульти використовують для керування, контролю та сигналізації електрифікованих і автоматизованих об'єктів (рис. 4.19 та рис. 4.20). На них

розміщуються прилади керування, контролю та вимірювальні прилади, а також засоби сигналізації та захисту.

Щити можна класифікувати за різними критеріями:

1) Призначення:

- Розподільні щити.
- Щити керування.
- Щити автоматизації.

2) Умови експлуатації:

- Щити для внутрішньої установки.
- Щити для зовнішньої установки.

3) Тип виконання:

- Щити навісні.
- Щити підлогові.

4) Ступінь захисту (за IP-класом):

- Щити з низьким ступенем захисту (для використання в сухих приміщеннях).
- Щити з високим ступенем захисту (для використання в умовах підвищеної вологості або пилу).

5) Матеріал конструкції:

- Металеві щити.
- Пластикові щити.

6) Складність і функціональність:

- Щити з базовим обладнанням.
- Щити з додатковим функціональним обладнанням (контролери, реле, сигнальні пристрої тощо).

7) Кількість встановлених приладів:

- Щити малої ємності (до кількох приладів).
- Щити великої ємності (багато приладів).

8) Тип електромережі:

- Щити для однофазної мережі.
- Щити для трифазної мережі.

9) Монтаж і обслуговування:

- Щити з переднім доступом для обслуговування.
- Щити з доступом з кількох боків.

Це дозволяє класифікувати щити залежно від їх характеристик та призначення.

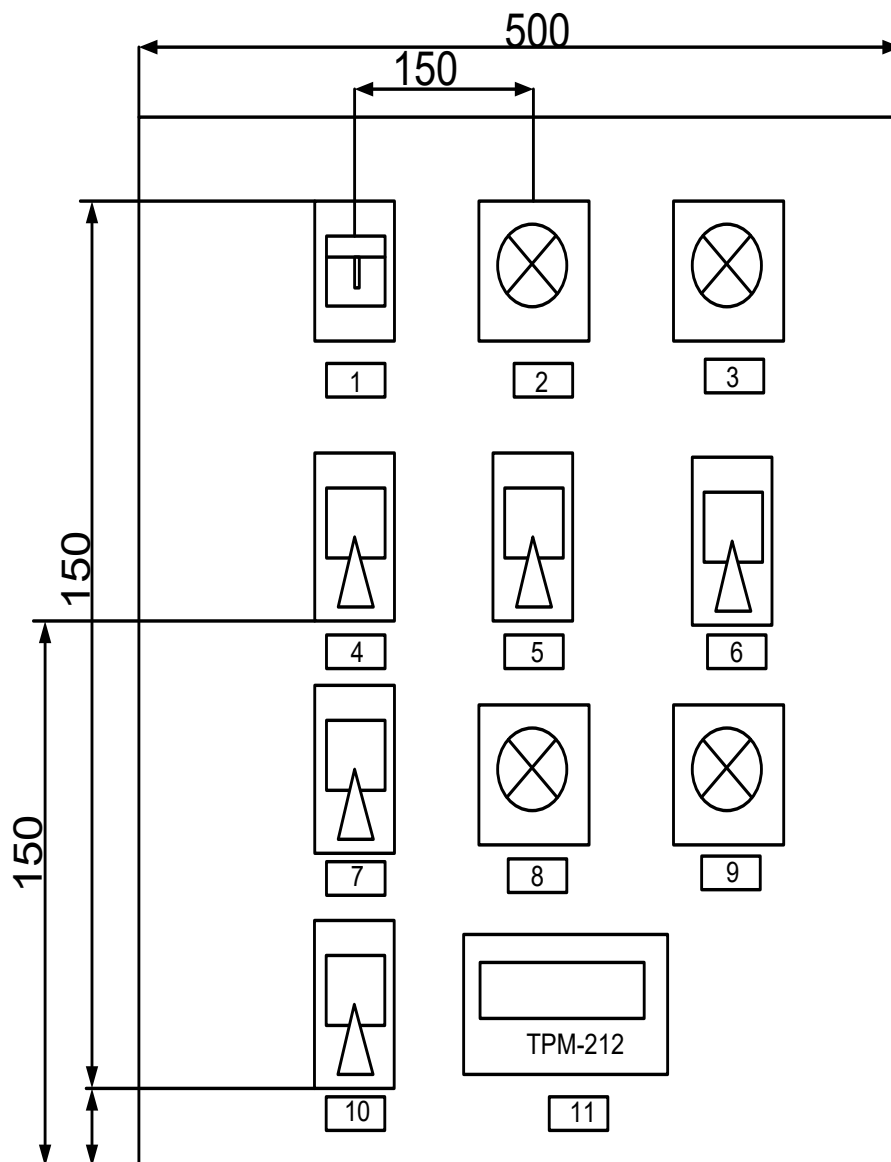


Рис. 4.19. Загальний вигляд щита ЩЦМ (500 · 500 · 25) У4Ір00

4.5. Монтаж системи автоматичного керування

Під час встановлення систем автоматизації та керування (САК) слід дотримуватися наступних вимог:

1. Розділення проводки: кабелі, які з'єднують електронні блоки керування з електричними датчиками, наприклад, термоопорами, повинні бути прокладені окремо від силових кабелів. Це можна зробити за допомогою використання окремих кабельних каналів або пластикових чи металевих труб з антикорозійним покриттям, що запобігає впливу зовнішніх факторів.

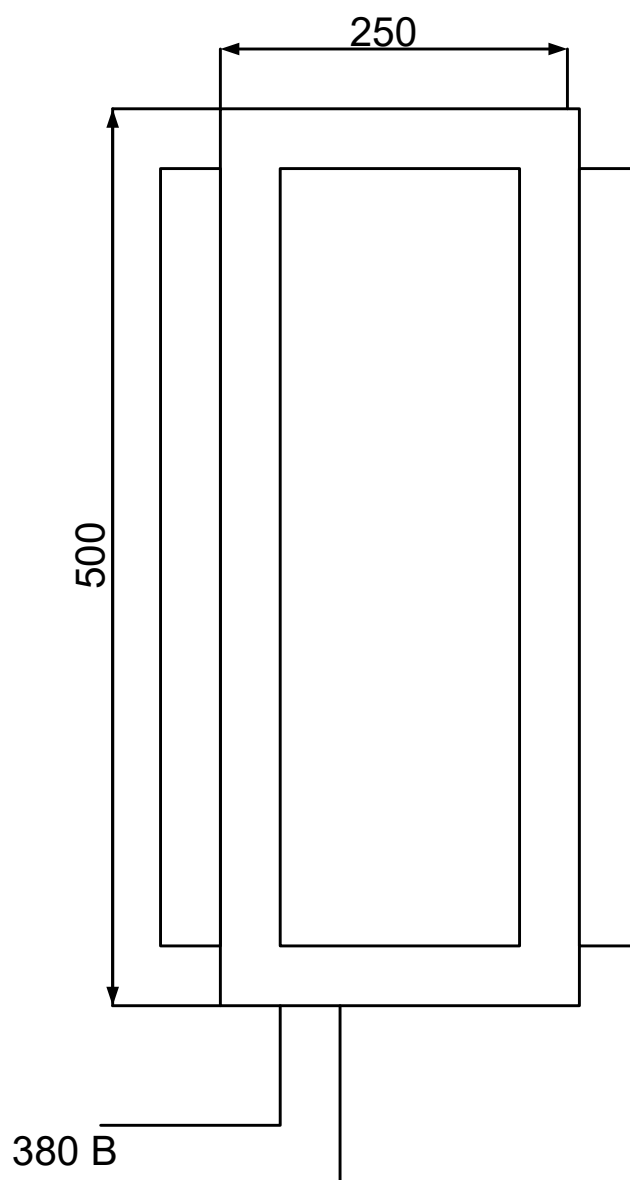


Рис. 4.20. Вигляд щита керування

2. Умови експлуатації: монтаж шаф керування з електронними блоками слід здійснювати у приміщеннях із забезпеченням оптимальних кліматичних

умов, що гарантують стабільну та безперебійну роботу обладнання. Важливо дотримуватися відповідних температурних режимів і рівнів вологості, визначених для конкретного обладнання. Після аналізу проєкту автоматизації та виконання необхідних підготовчих робіт починається монтаж, що відбувається у два етапи залежно від стану завершення будівельних робіт.

Перший етап включає:

1. Встановлення несучих конструкцій для електропроводки.
2. Монтаж керуючого щита та місцевих приладів.
3. Перевірку наявності засувних елементів та отворів у будівельних конструкціях.
4. Встановлення регулятора.
5. Монтаж виконавчих механізмів.
6. Встановлення датчиків.

Ці роботи проводяться паралельно з основними будівельно-монтажними роботами.

Другий етап включає:

1. Прокладання та налаштування електропроводки.
2. Випробування ізоляції кабелів.
3. Монтаж приладів та систем автоматизації.
4. Підключення електричних приладів.

Роботи другого етапу виконуються у внутрішніх приміщеннях після завершення основних будівельних робіт і проводяться разом із монтажними роботами інших спеціалізованих організацій за узгодженим графіком.

Монтаж програмного обладнання та вимірювальних датчиків складається з таких етапів:

1. Вибір відповідного місця для встановлення обладнання з урахуванням можливості збоїв або нестабільної роботи при розташуванні поблизу потужних пускачів або реле.

2. Підготовка місця на керуючому щиті з урахуванням розмірів приладу. Конструкція щита повинна забезпечувати захист обладнання від вологи, пилу та сторонніх предметів, оскільки на корпусі можуть бути вентиляційні отвори.

3. Під час встановлення приладу необхідно враховувати, що в його клемному пристрої є відкриті контакти, а під час роботи на них присутня напруга 220 В і частота 50 Гц, що є небезпечним для людей. Тому прилад слід монтувати на спеціальних щитах, доступ до яких мають лише кваліфіковані фахівці.

Монтаж зовнішніх з'єднань має відповідати наступним вимогам:

1. Живлення приладу здійснюється через мережевий фідер з напругою 220 В і частотою 50 Гц, який не повинен бути спільним з живленням потужного силового обладнання. У зовнішньому колі слід встановити вимикач живлення, що дозволить відключати прилад від мережі у разі необхідності.

2. Підключення приладу до температурних датчиків слід виконувати за допомогою трьохжильних проводів з однаковим опором. Довжина комунікаційної лінії не повинна перевищувати 100 метрів, а опір кожної жили не має перевищувати 15 Ом.

3. Лінія зв'язку між адаптером та приладом повинна бути виконана з екранованих пар проводів, а її довжина не повинна перевищувати 1000 метрів.

Рекомендації щодо монтажу:

1. Підготуйте кабелі для з'єднання приладу з датчиками, виконавчими механізмами, зовнішніми пристроями та джерелом живлення (220 В, 50 Гц). Рекомендується використовувати багатожильні мідні кабелі для надійних електричних з'єднань. Перед підключенням кабелів слід ретельно очистити і зачистити контактні поверхні. Переконайтеся, що оголені кінці кабелю після підключення не виступають за межі клемної зони.

2. Після завершення монтажних робіт встановлене та підключене обладнання передається в експлуатацію персоналу замовника.

Під час монтажу технологічного обладнання виконуються послідовні та ретельно контрольовані етапи, включаючи з'єднання окремих деталей і

складальних одиниць, монтаж блоків і пристроїв, точне встановлення елементів, монтаж кіл керування та сигналізації контрольних кабелів, а також налаштування і випробування змонтованого обладнання.

Виконання монтажних робіт при встановленні щитів керування, захисних пристроїв та автоматики покладається на електромонтажні бригади.

Для організації електромонтажних робіт необхідно забезпечити електромонтажників усією необхідною технічною документацією, матеріалами, інструментами та спеціальним обладнанням. Також слід вжити всіх заходів для забезпечення безпеки під час виконання робіт. Для початку монтажних робіт необхідно передати монтажній організації проєктну документацію, яка повинна відповідати вимогам ЄСКД та СПДБ і бути у двох або більше примірниках. Технічна документація має містити всі необхідні документи для монтажу, включаючи електричні принципові схеми та пояснювальні записки. Перед початком робіт необхідно оформити замовлення на виготовлення обладнання та збірку вузлів, а також підготувати складські та побутові приміщення. Також потрібно забезпечити прибирання і наявність всіх необхідних інструментів, пристосувань та матеріалів. Під час монтажу апаратів здійснюється встановлення різноманітних компонентів, таких як перемикачі, кнопки керування, випробувальні блоки, допоміжні пристрої, запобіжники, автоматичні вимикачі, реле, а також вимірювальні і сигнальні прилади. Крім того, щит монтажу доповнюється елементами дизайну, включаючи мнемонічні схеми, рамки для написів, накладні букви та інші деталі оформлення. Перед початком монтажу слід ознайомитися із загальним кресленням панелі, на якому зображене розташування обладнання з фасаду, рядів затискачів з монтажною стороною, а також перелік монтажних одиниць. Прилади і апарати потрібно уважно переглянути та перевірити наявність усіх необхідних кріпильних елементів для забезпечення надійних контактів.

При монтажі панелей потрібно перевірити та налаштувати електровимірювальні пристрої і реле, що встановлені на них.

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

5.1. Розробка і побудова функціональної та структурно-алгоритмічної схеми САК

Функціонально-структурна схема системи автоматичного керування (САК) відображає основні функціональні елементи системи та їхні взаємозв'язки. Функціональні елементи представлені у вигляді прямокутників, всередині яких міститься скорочена назва відповідного елемента. Зв'язки між елементами зображені лініями зі стрілками, що вказують напрямок передачі сигналу або інформації (рис. 5.1).

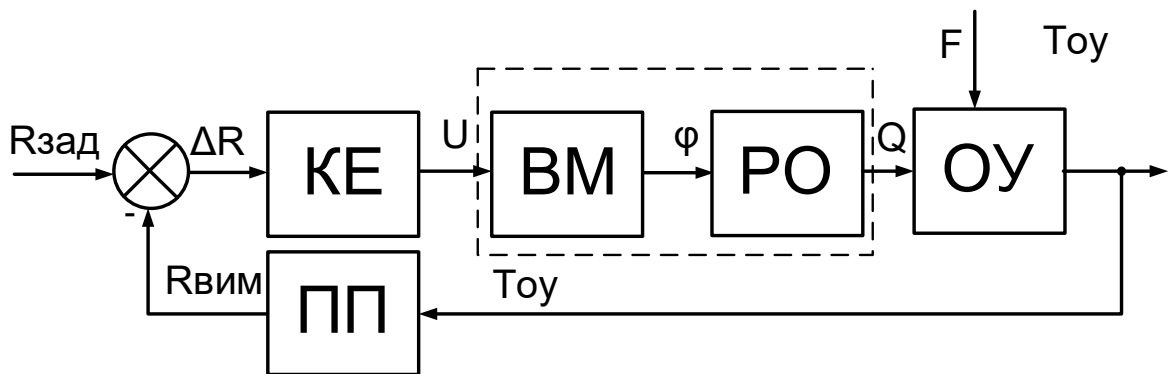


Рис. 5.1. Функціонально-структурна схема САК температурним режимом в біогазовій установці

На наведеній схемі САК зображені такі основні елементи:

КЕ – коректувальний елемент;

ВМ – виконавчий механізм;

ОУ – об'єкт керування – теплопровід;

ПП – сприймаючий елемент – датчик температури;

$R_{\text{зад}}$ – задане значення опору;

$T_{\text{оу}}$ – температура субстрату в біогазовій установці;

$\Delta R = R_{\text{зад}} - R_{\text{вим}}$;

$R_{\text{вим}}$ – значення опору що вимірюється;

U – напруга керування;

F – збурення на ОУ.

Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного керування (САК) відображає динамічні характеристики функціональних елементів, що складають математичну модель процесу керування. Ця схема показує, які типові динамічні компоненти входять до складу системи і як вони взаємодіють. Для її розробки використовуються функціональна схема та передатні функції окремих елементів системи. Елементи, зображені на функціональній схемі, представлені у вигляді прямокутників, а зв'язки між ними позначаються лініями зі стрілками, що вказують напрямок сигналу.

Для наочного представлення компонентів системи використовують графічні зображення, які демонструють їх передатні функції. Завдяки аналізу вимог до елементарних ланок визначаються конкретні передатні функції для кожного окремого елемента системи:

- 1) Об'єкт керування

$$W_{oy}(s) = \frac{0,2}{320s + 1} \cdot e^{-20s}.$$

- 2) Передатна функція регулятора:

$$W_{PID}(s) = \frac{39s^2 + 0,25s + 0,0000001}{s}.$$

- 3) Передатна функція датчика:

$$W_{oy}(s) = \frac{0.21}{15s + 1}.$$

- 4) Передатна функція виконавчого механізму та регулюючого органу:

$$W_{BM}(s) = \frac{1}{10s}.$$

Структурно-алгоритмічна схема САК, яка відображає температуру в метантенку, показана на рис. 5.2.

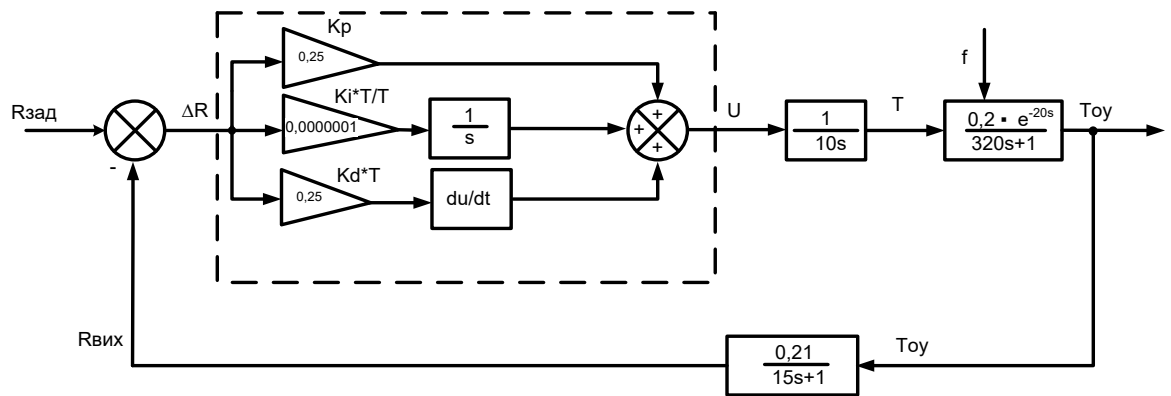


Рис. 5.2. Структурно-алгоритмічна схема САК

5.2. Побудова АФЧХ розімкненої САК

Амплітудно-фазова характеристика (АФЧХ) є графічним зображенням, яка демонструє, як амплітуда та фаза вихідного сигналу змінюються в залежності від частоти вхідного сигналу при фіксованій амплітуді вхідного сигналу. АФЧХ обчислюється з передатної функції САК, де s замінюється на $j\omega$.

Тоді вираз для АФЧХ розімкненої САК має наступний вигляд: .

$$W_{роз}(j\omega) = \frac{3,003(j\omega)^2 + 0.0019(j\omega) + 0,0000001 \cdot e^{-20j\omega}}{1920 \cdot (j\omega)^3 + 326 \cdot (j\omega)^2 + (j\omega)}.$$

Для побудови графіку амплітудно-фазової характеристики (АФЧХ) системи ми використали програму MatLab (рисунок 5.3). Потім проводимо оцінку стійкості системи за допомогою критерію Найквіста.

Графік АФЧХ не перетинає точку $(-1,0)$, що свідчить про стабільність системи. Наступним кроком є визначення запасів стійкості системи, зокрема запасу за фазою та запасу за амплітудою.

Запас стійкості за фазою можна оцінити як кут, на який потрібно повернути графік АФЧХ, щоб він проходив через точку $(-1,0)$.

Запас стійкості системи за амплітудою можна визначити як відстань від точки перетину графіка АФЧХ з віссю ОХ до точки (-1,0):

$$\Delta L = 20 \cdot \lg \left(\frac{1}{\operatorname{Re}|W_{\text{роз}}(j\omega)|} \right) = 20 \cdot \lg \left(\frac{1}{|-0.0375|} \right) = 28.52 \approx 28.7 \text{ дБ.}$$

Запас надійності по амплітуді – 27,7дБ (децибел). Запас надійності по фазі – 31,4° (градуси).

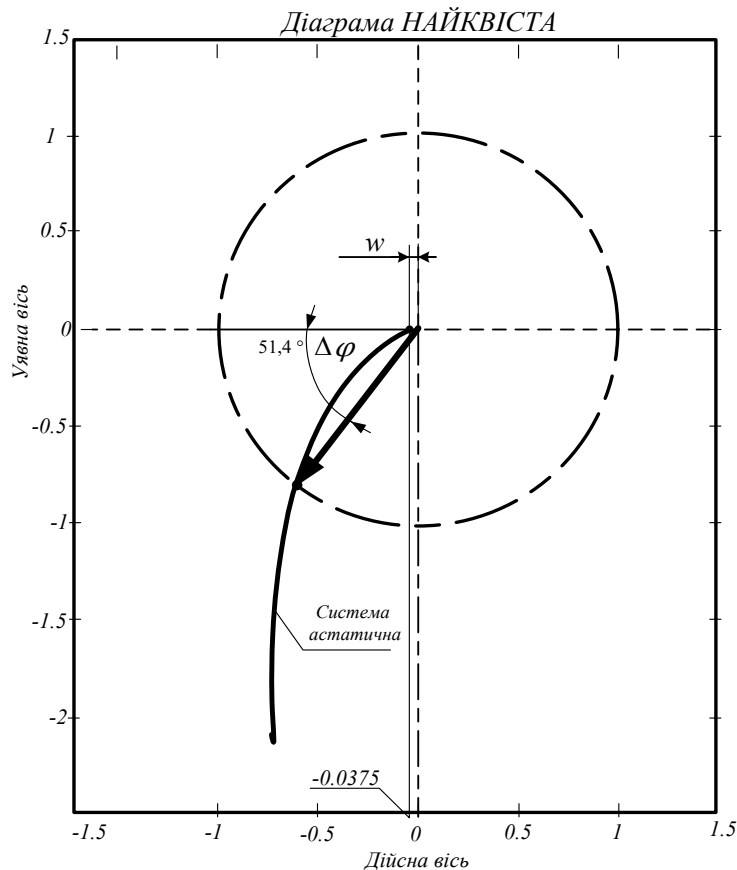


Рис. 5.3. Амплітудно-фазова частотна характеристика

5.3. Побудова перехідного процесу замкненої системи

Перехідний процес САК - це зміна вихідної величини системи протягом, коли на вхід надходить сигнал у вигляді одиничної сходинок.

$$1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{при } t < 0 \end{cases}$$

У початковий момент часу $t=0$ система перебуває у початковому стані без жодних початкових умов. Аперіодичний процес характеризують

максимальним динамічним відхиленням, швидки часом регулювання та позбавлений перерегулювання. При регулюванні на 20% отримаємо перехідний процес що має середню якість, мінімальну площу між кривою перехідного процесу та віссю часу, але супроводжується значним перерегулюванням, найдовшим часом регулювання та мінімальним динамічним відхиленням. Використаємо математичний пакет Matlab для побудови нормованого перехідного процесу для некоригованої САК (рисунок 5.4 і рисунок 5.5).

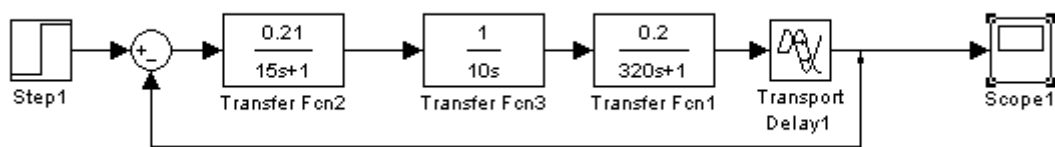


Рис. 5.4. Блочна модель у середовищі Matlab не скоректованої САК

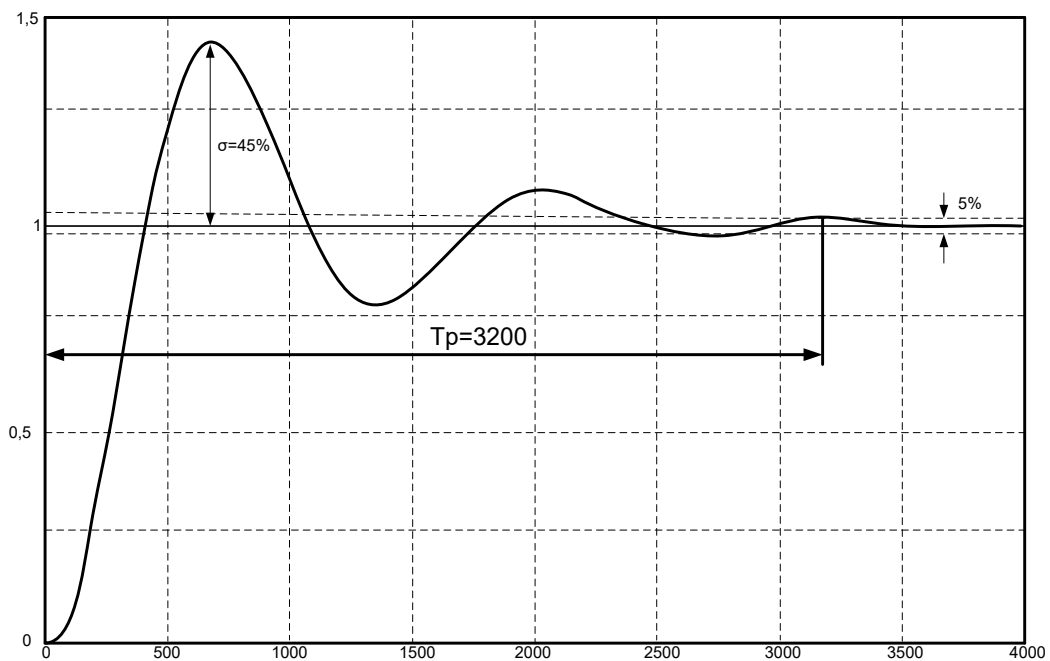


Рис. 5.5. Перехідний процес замкненої не скоректованої САК

Аналізуючи криву перехідного процесу некоригованої САК, можна визначити такі критерії якості:

1. Статична похибка (δ) — це показник точності системи в стані рівноваги, і в даному випадку вона становить 0%.

2. Час регулювання (t_p) — це тривалість, протягом якої регульована величина досягає свого сталого значення. Для цієї системи час регулювання становить 3500 секунд.
3. Перерегулювання (σ) — характеризує максимальне відхилення регульованої величини від встановленого значення і обчислюється за відповідною формулою.

$$\sigma = \left(\frac{X_{\text{макс}} - X_{\text{уст}}}{X_{\text{уст}}} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{1.45 - 1}{1} \right) \cdot 100\% = 45\%.$$

Кількість коливань $n=3$. Час регулювання $t_{\text{рег}} \approx 3200\text{с}$. Статична похибка: $\delta = (1 - X_{\text{уст}}) \cdot 100\% = (1 - 1) \cdot 100\% = 0$.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що жоден із показників перехідного процесу не відповідає технічним вимогам.

Наступним кроком є побудова перехідного процесу для скоригованої САК (рисунки 5.6 та 5.7).

Аналізуючи криву перехідного процесу з використанням регулятора, можна оцінити такі показники якості:

1. Гладкість перехідного процесу або кількість коливань вихідної величини протягом часу регулювання t_p — у цьому випадку становить нуль ($n=0$).
2. Точність статичного усталеного стану САК, що відображає статичну похибку, яка дорівнює нулю ($\delta = 0\%$).
3. Час регулювання (t_p) — це час, за який регулююча величина досягає сталого значення. Для нашого об'єкта цей час становить 1682 секунди.
4. Перерегулювання (σ) — відображає максимальне відхилення регульованої величини від встановленого значення та визначається за відповідною формулою.

$$\sigma = \frac{1.17 - 1.0}{1.0} \cdot 100\% = 0\%.$$

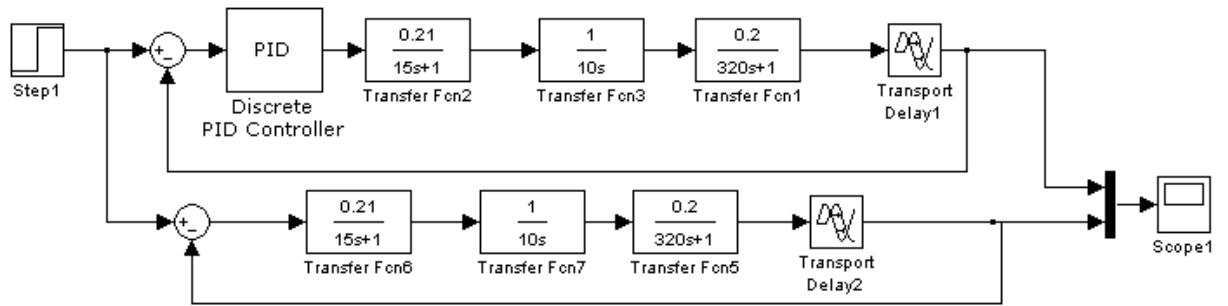


Рис. 5.6. Блочна модель у середовищі Matlab скоректованої САК

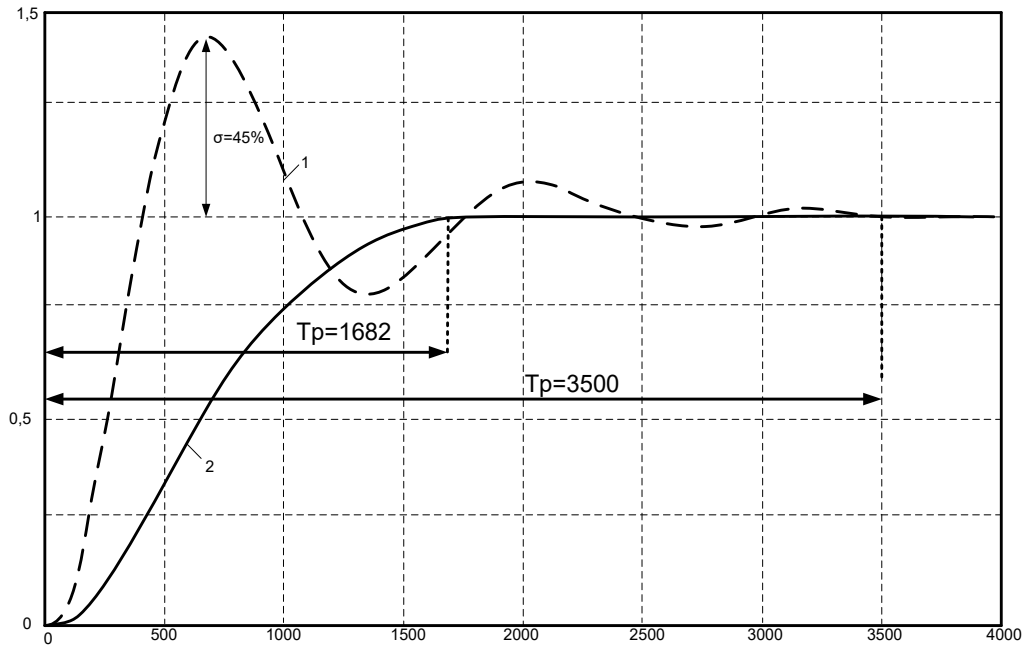


Рис. 5.7. Перехідний процес САК:

крива 1 – для не скоректованої, крива 2 – для скоректованої САК

З наведених результатів бачимо, що всі параметри перехідного процесу задовільняють технологічні вимоги.

6. РОЗРОБКА ДВОРІВНЕВОЇ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ

6.1 Розробка програми керування ПЛК ОВЕН 200

Розробка програми керування виконується за допомогою програмного середовища CoDeSys v3.5 розробленого для програмування ПЛК марки ОВЕН. Основний текст програми ПЛК було написано на мові ST. Перевірка працездатності системи керування виконана за допомогою симуляції ПЛК ОВЕН 200.

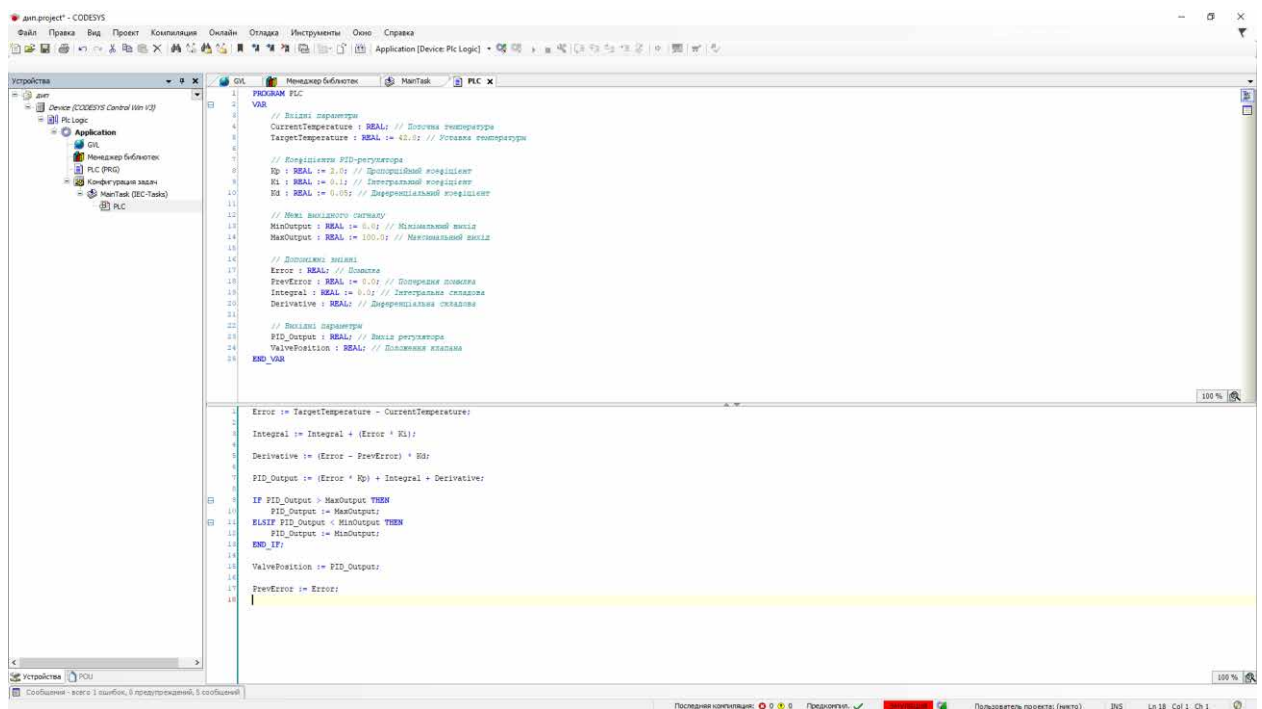


Рис.6.1. Програма керування температурою БГУ

6.2. Структура комп'ютерно-інтегрованої системи

Комп'ютерно-інтегрована система керування процесом побудуємо у двох рівнях:

Рівень 1 – керування технологічними процесами локальними пристроями (контролер, частотний перетворювач, датчики, виконавчі механізми)

Рівень 2 – керування пристроями з комп'ютеру за допомогою СКАДА-системи, відображення графіків, архівування, зв'язок с базою даних SQL, отримання значення температури, дистанційне спостереження за допомогою «хмарних технологій».

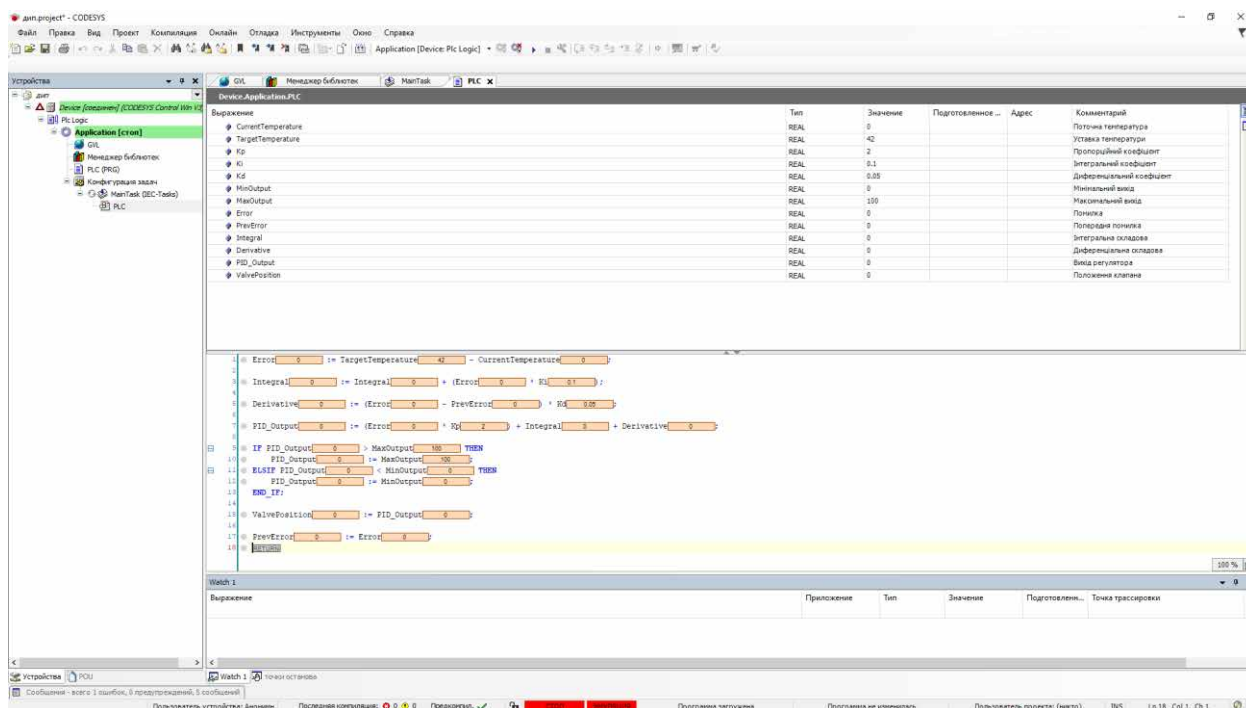


Рис.6.2. Симуляція ПЛК ОВЕН 200 із завантаженою програмою

6.3. Розробка блок-схеми алгоритму роботи комп'ютерно-інтегрованої системи

Алгоритм полягає у автоматичному керуванні швидкості серводвигуна із використанням регулятора, реалізованого програмно. Сигнал з виходу регулятора є завданням на швидкість регульованого електроприводу. В цьому випадку зупинка двигуна проводиться на невеликій швидкості (без шкоди для продуктивності), маса «падаючого стовпа» невелика, а нестабільність властивостей матеріалу позначається на точності дозування не суттєво. Правильний вибір параметрів регулятора ваги дає можливість оптимізувати співвідношення продуктивності й точності. Для керування процесу метаногенезу з комп'ютера запроектовано комп'ютерно-інтегровану систему на базі SCADA-системи Trace Mode версії 6.0.

Функції системи

Система забезпечує:

- Автоматичне контроль і управління температурою.
- Зберігання в енергозалежній пам'яті необхідної інформації.
- Відображення на панелі оператора інформації про хід процесу метаногенезу.
- Сигналізацію про стан виконавчих механізмів і діагностованих аваріях.
- Можливість роботи системи як в автоматичному, так і в ручному режимі.
- Створення статичного архіву.
- Передачу поточної статистики на диспетчерський пункт або мобільний пристрій (смартфон, планшет).
- Архівацію даних на карту пам'яті, в хмарний сервіс або SCADA-систему підприємства.
- Алгоритм керування системи дає змогу вибрати оптимальну температуру.

Таблиця 5.1.

Специфікація контролеру ПЛК-200

Найменування	Кількість
Програмований логічний контролер	1 шт.
Кабель для ПЛК	1 шт.
Модуль аналогового вводу сигналів тензодатчиків	1 шт.
Сенсорна панель оператора	1 шт.
Блок живлення для панелі оператора	1 шт.
Перетворювач частоти	1 шт.
Локальна панель оператора з потенціометром для ПЧВ	1 шт.

6.4. Розробка програмного забезпечення за допомогою SCADA-системи Trace Mode

SCADA система Trace Mode як єдине інтегроване середовище розробки та диспетчеризації, об'єднує в собі більше 10 різних редакторів проекту АСУ ТП і АСУП, за своєю функціональністю давно вже переросла рамки традиційної SCADA: вбудована підтримка найбільш популярних програмних інтерфейсів - ODBC, OPC, DDE, що забезпечують інтеграцію з зовнішніми базами даних (БД) і іншими додатками; вбудований редактор SQL-запитів для полегшення налаштування взаємодії з базами даних та ін. Стандарт ODBC дозволяє організовувати взаємодію як з потужними реляційними СУБД, такими як Oracle або MS SQL Server, так і з популярною СУБД MS Access. До складу серверів Trace Mode, що дозволяє отримувати дані з будь-якого OPC-сервера, що дозволяє підключати зовнішні додатки, об'єкти управління АСУ ТП та інші SCADA-системи до контролерів і ПК, що працюють під управлінням Trace Mode.

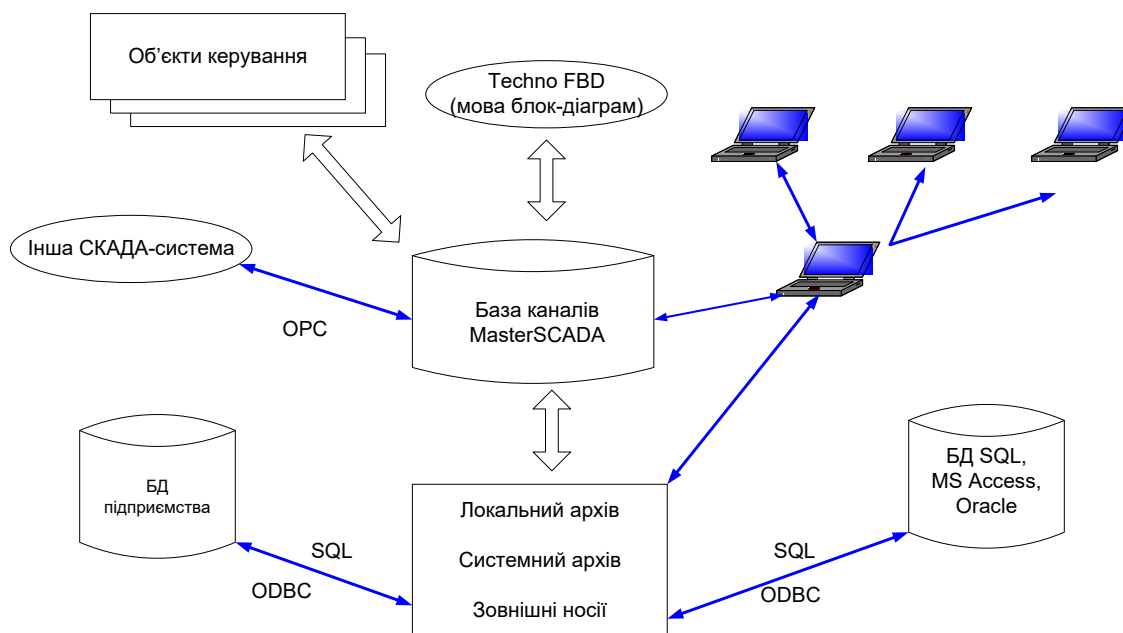


Рис. 6.3 - Модель інтеграції баз даних в систему керування технологічного процесу метаногенезу

Модель інтеграції баз даних в систему керування технологічного процесу бродіння сировини в метантенку представлена на рис. 6.3. ODBC

(Open DataBase Connectivity) - широко застосовуваний прикладний програмний інтерфейс (API) для доступу до БД, використовує SQL.

Запуск програми Trace Mode

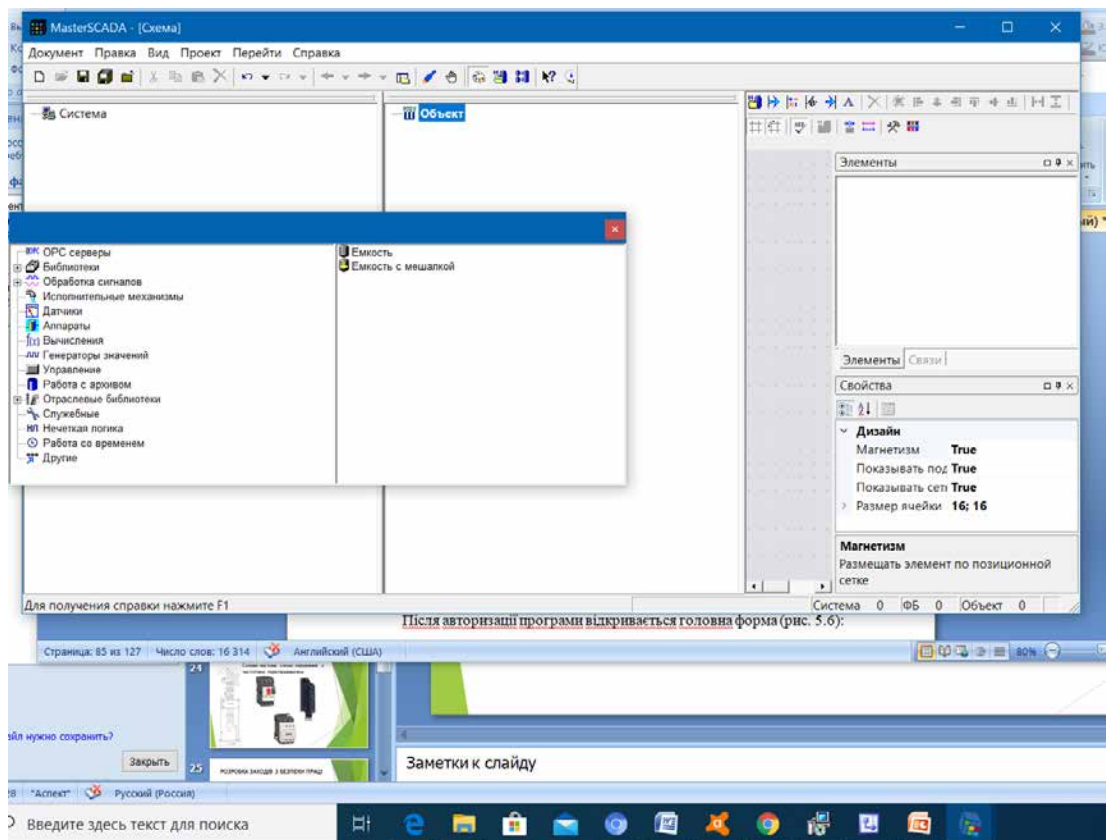


Рис. 6.4. Створення мнемосхеми

Після авторизації програми відкривається головна форма (рис. 6.4). На ній показано стан бункерів та змішувачів на момент початку сеансу. Все технологічне обладнання виділено червоними кнопками що відповідає їх непрацюючому стану. Після натиснення на кнопку «Старт» відбувається процес регулювання температури метантенку. Це продемонстровано на рис. 6.5. На даному етапі можна візуально спостерігати процес виготовлення комбікорму та завантаженості бункерів та кількості сировини що знаходиться в змішувачі. Працюючі елементи виділені зеленими індикаторами.

Якщо натиснути кнопку «Заявка» то можна ввести дані про дату, номер рецепту, номер заявки та назву сировини. На наступній формі відображається текстове відображення стану обладнання включаючи кількісні показники в

даний момент часу. Після натиснення кнопки «Виконати заявку» відкривається повернення до головної форми.

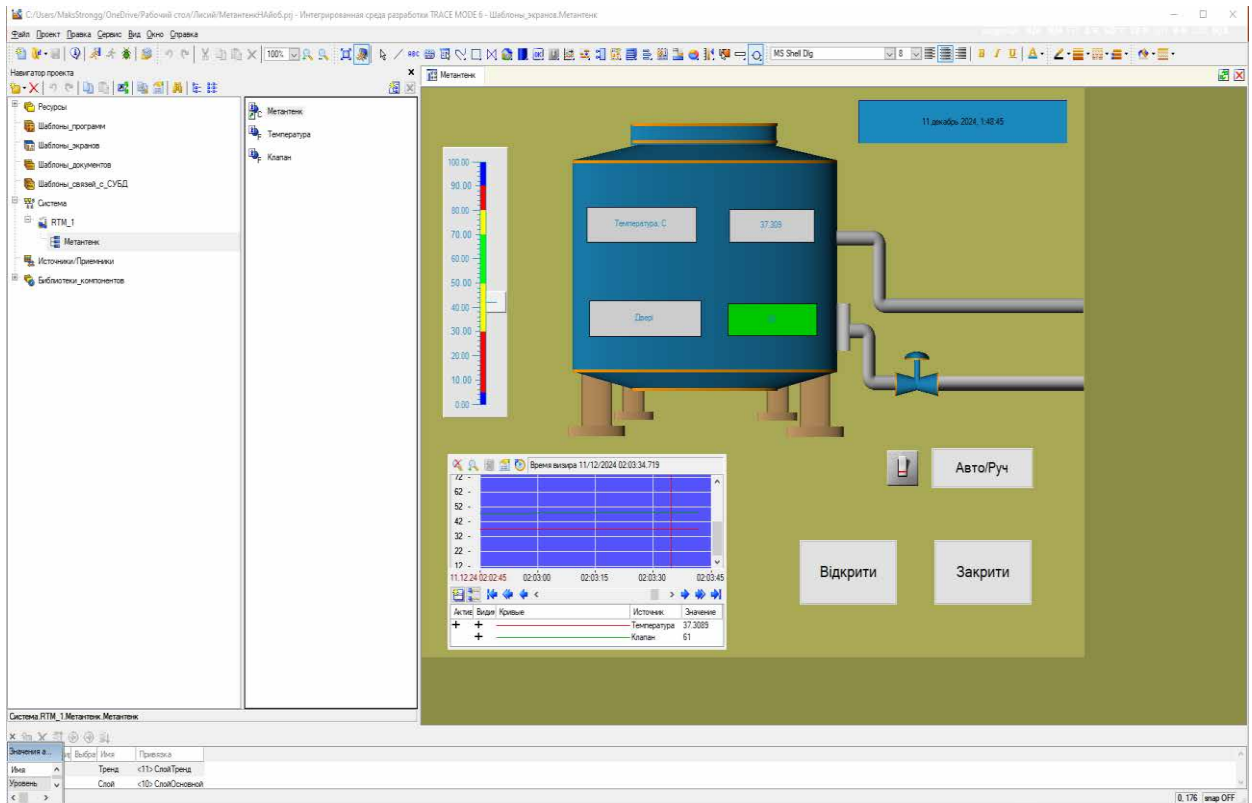


Рис. 6.5. Процес регулювання температури метантенку .

Робота з базами даних

Основне завдання SCADA системи - збір даних з нижнього рівня і представлення отриманих даних оператору. Однак найчастіше потрібно отримувати дані не тільки від контролерів, модулів та іншого технологічного обладнання, а й від різних програмних продуктів - MES-систем, інших SCADA систем, програм бухгалтерського обліку. Взаємодія з ними, як правило, здійснюється через базу даних за допомогою SQL-запитів. Можливо використовувати бази даних для розширення функціоналу програмного пакету TraceMode - наприклад, використання баз для зберігання архівів даних з використанням способів способи взаємодії TraceMode і різних SQL-серверів [10]. На даний момент Trace Mode підтримує наступні бази даних: (БД) –

Microsoft SQL, Oracle, Firebird, MySQL, Interbase. Взаємодія з базами даних може здійснюватися в трьох режимах:

1) Зберігання даних і повідомлень. В цьому випадку БД використовується замість стандартного файлового архіву TraceMode - дані записуються в базу, і при запиті зчитуються з неї. В цьому режимі TraceMode самостійно створює таблиці і процедури.

2) Експорт даних і повідомлень (повідомлення можуть експортуватися тільки в Access). Даний режим призначений для передачі накопичених даних або повідомлень іншим програмам. У разі використання для експорту Access дані передаються в базу за певним події (це може бути розклад або команда від оператора), дані передаються в базу даних. У разі експорту через БД-коннектор дані передаються в базу безперервно – по мірі появи нових даних. В цьому режимі TraceMode самостійно створює таблиці і необхідні процедури.

3) Використання збережених функцій і процедур. Якщо режим експорту дозволяє тільки записувати дані, то використання збережених процедур дозволяє, як писати, так і зчитувати дані з БД. Крім того в збереженій процедурі можна провести обробку даних. У цьому режимі користувач самостійно створює таблиці і збережені процедури, використовуючи засоби адміністрування бази даних. TraceMode в режимі виконання може викликати створену збережену процедуру, передавати і отримувати з неї дані.

Ми розглянемо всі три режими роботи. Слід відмітити, що режим зберігання даних і експорту не вимагає знань SQL - SCADA самостійно створює необхідні їй таблиці і процедури.

На даній закладці задаються параметри підключення до бази - *шлях до сервера, ім'я бази даних і тип підключення.*

Створимо базу даних. Перед тим як створювати базу даних, слід переконатися що SQL сервер запущений. Для цього виконайте команду Пуск - Програми - Microsoft SQL Server Рік випуску 2008 - Засоби налаштування - Диспетчер конфігурації SQL Server. З'явиться вікно (рис. 6.7).

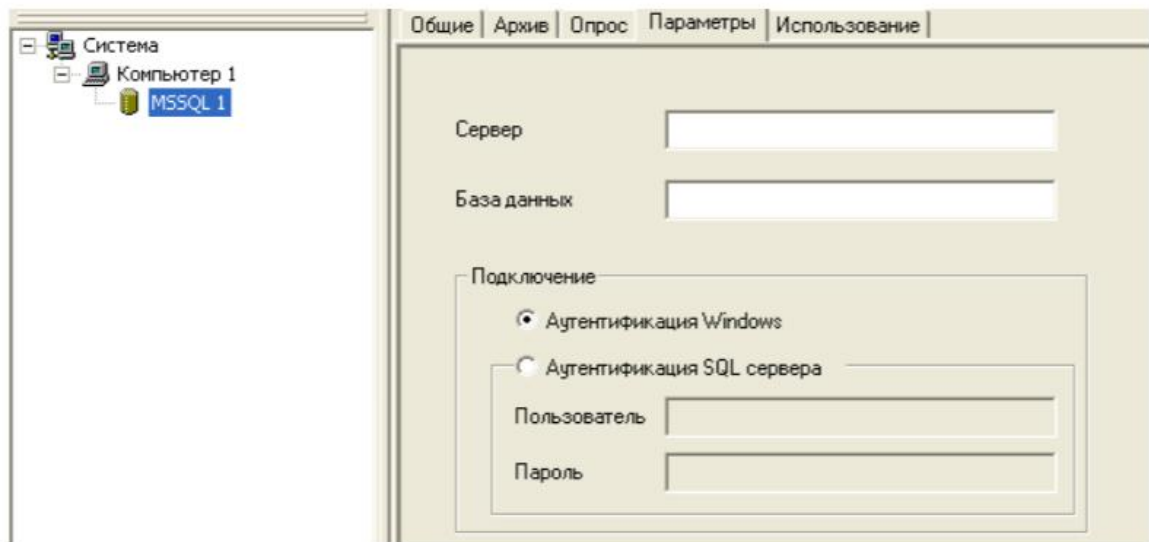


Рис. 6.6 – Вікно встановлення параметрів підключення до бази даних

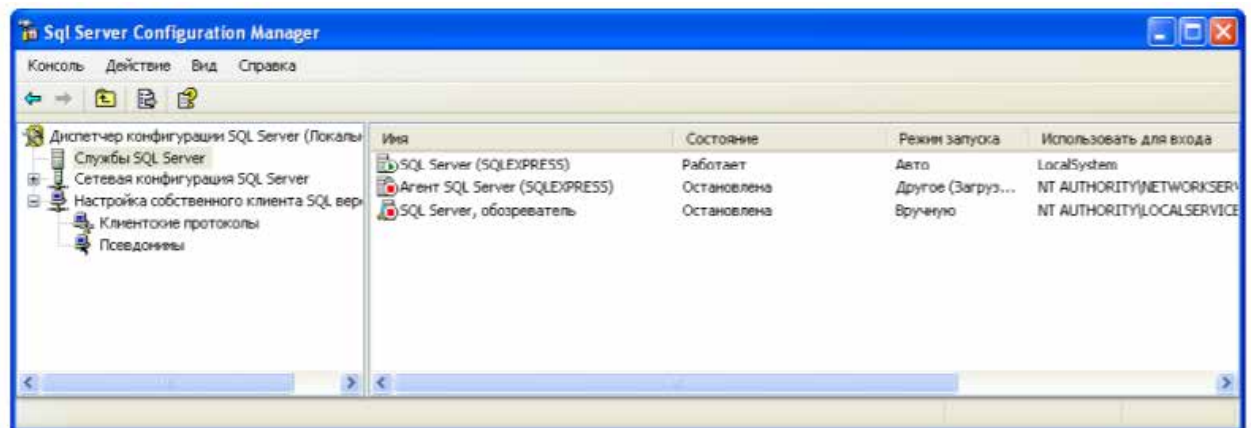


Рис. 6.7 – Вікно диспетчера конфігурації SQL Server

Запустимо утиліту адміністрування - Management Studio (Пуск - Програми - Microsoft SQL Server 2008 - Середовище SQL Server Management Studio) З'явиться вікно З'єднання з сервером. В ньому потрібно вказати ім'я сервера для підключення і тип перевірки автентичності. Натиснемо на кнопку З'єднати (рис. 6.8). Завантажиться графічний інтерфейс утиліти адміністрування. У лівій частині вікна знаходиться оглядач об'єктів. Створимо базу даних. Для цього виклинемо контекстне меню об'єкта *Бази даних* і виберемо пункт: *Створити базу даних ...* (рис. 6.9). З'явиться вікно створення бази даних (Рис.). Введемо ім'я бази даних: «Korma». Перейдемо на закладку Використання. Встановимо галочку: Використовувати для

зберігання архівів проекту і натиснемо кнопку Застосувати. Після цього натиснемо на кнопку: *пересоздать Все*. Запускається процес створення таблиць і процедур. Натиснемо на кнопку: Перевірити підключення та структуру - якщо немає помилок при підключенні і структура бази даних відповідає режиму роботи з'явиться повідомлення (рис. 6.10).

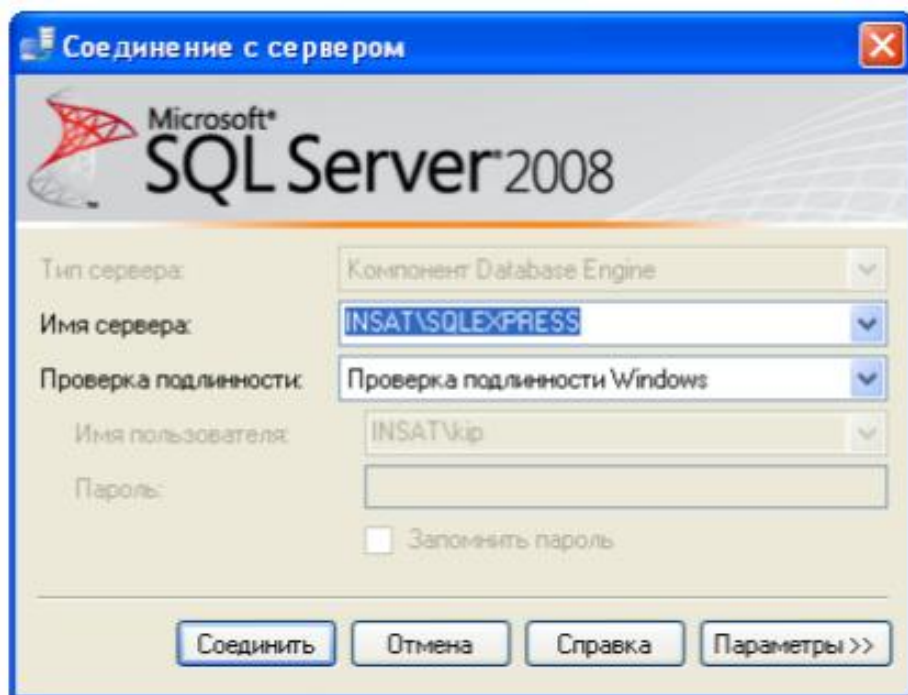


Рис. 6.8 – Вікно з'єднання з сервером MS SQL Server 2008

Передача в реальному часі в систему керування і накопичення в БД великої кількості параметрів стосовно рецепту комбікорму, роблять завдання важко формалізуємим і призводять до виникнення проблем інформаційного перевантаження, чого легко можна уникнути впровадженням інтелектуальної SCADA - системи, яка функціонально включає, крім традиційних, ситуаційний і логічний аналіз подій і станів, прогноз поведінки технологічного процесу в часі і оперативний вибір рекомендацій для персоналу при виникненні нештатних ситуацій.

У режимі реального часу через вхідні аргументи в SQL-запит передаються дані з каналів MasterScada, виконуються запрограмовані транзакції через стандартний інтерфейс ODBC, а потім отримані результати передаються через вихідні аргументи назад в канали.

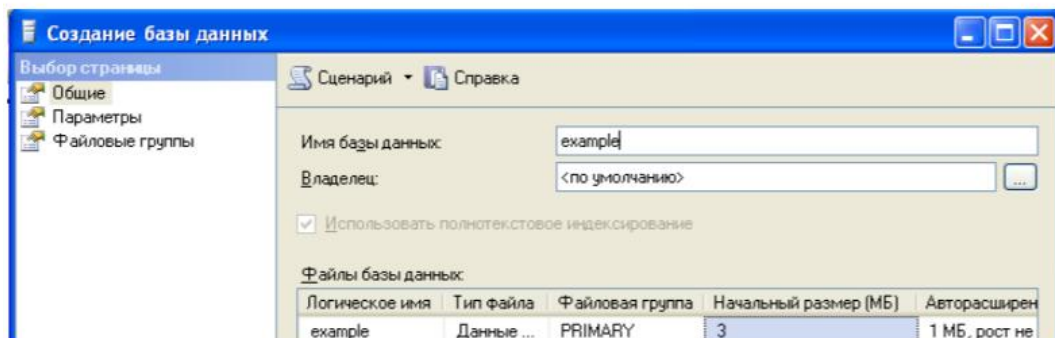
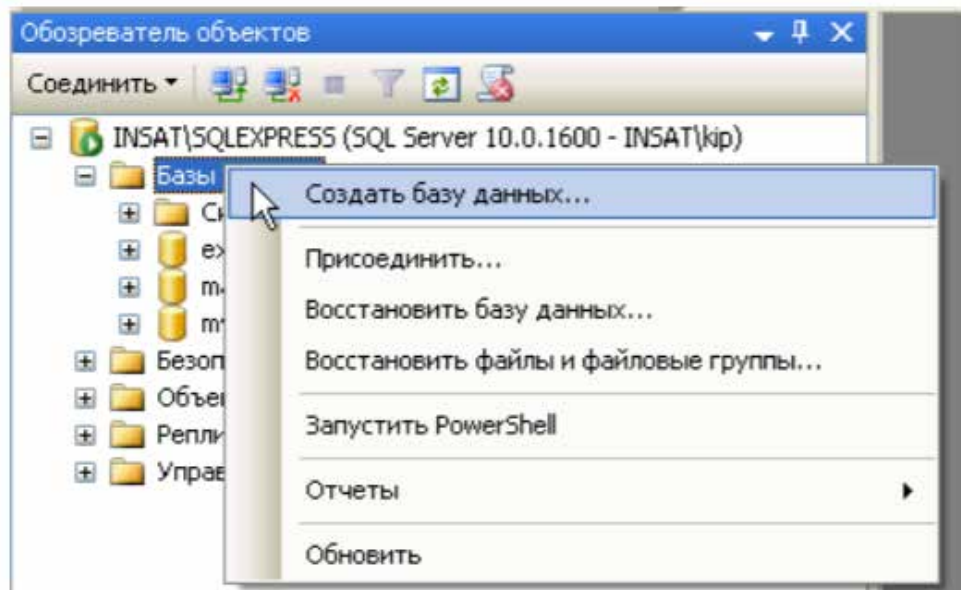


Рис. 6.9 - Створення бази даних SQL

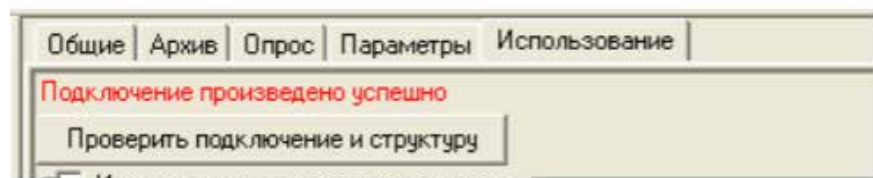


Рис. 6.10 – Повідомлення про успішність підключення бази даних SQL до Trace Mode

6.5. Використання хмарних технологій при автоматизації метантенку

Хмарні технології дозволяють спостерігати за ходом технологічного процесу та дистанційного налаштування, керування з будь-якого комп'ютера, що має доступ до мережі інтернет, або зі смартфона , на якому встановлено

мобільний додаток. Для керування встановлюється програма SoMashine, яку можна завантажити з офіційних сайтів ОВЕН (owen.ua).

Центральний процесор керування CPU 313SC/DPM встановлюється на одну лінійну рейку, при чому на одній лінійці можна встановити до 32 модулів. Кожен CPU має тумблер перемикання роботи, вбудований інтерфейс. Модулі розширення також встановлюються на одній і тій же рейці, де й процесор. Внутрішній зв'язок між модулями CPU та модулями розширення здійснюється за допомогою шинних з'єднувачів. Для програмованого контролера ОВЕН ТРМ обрані дискретні й аналогові модулі розширення, які використовуються контролером. Комунікаційний процесор CP 340 призначений для організації послідовного зв'язку через РРІ інтерфейс. На фізичному рівні зв'язок може бути здійснено за послідовними інтерфейсами RS 232C (V.24), 20мА струмової петлі (TTY), RS 422/ RS 485 (X.27). Для передачі даних можуть використовуватися протоколи ASCII, 3964(R) , а також протокол принтера. Розробку візуалізації починаємо з розробки програми та візуалізації приладу (рис. 6.11). Створення програми починаємо зі створення необхідних аргументів які використовуються в проекті. У вікні налаштувань приладу вказуємо IP адресу.

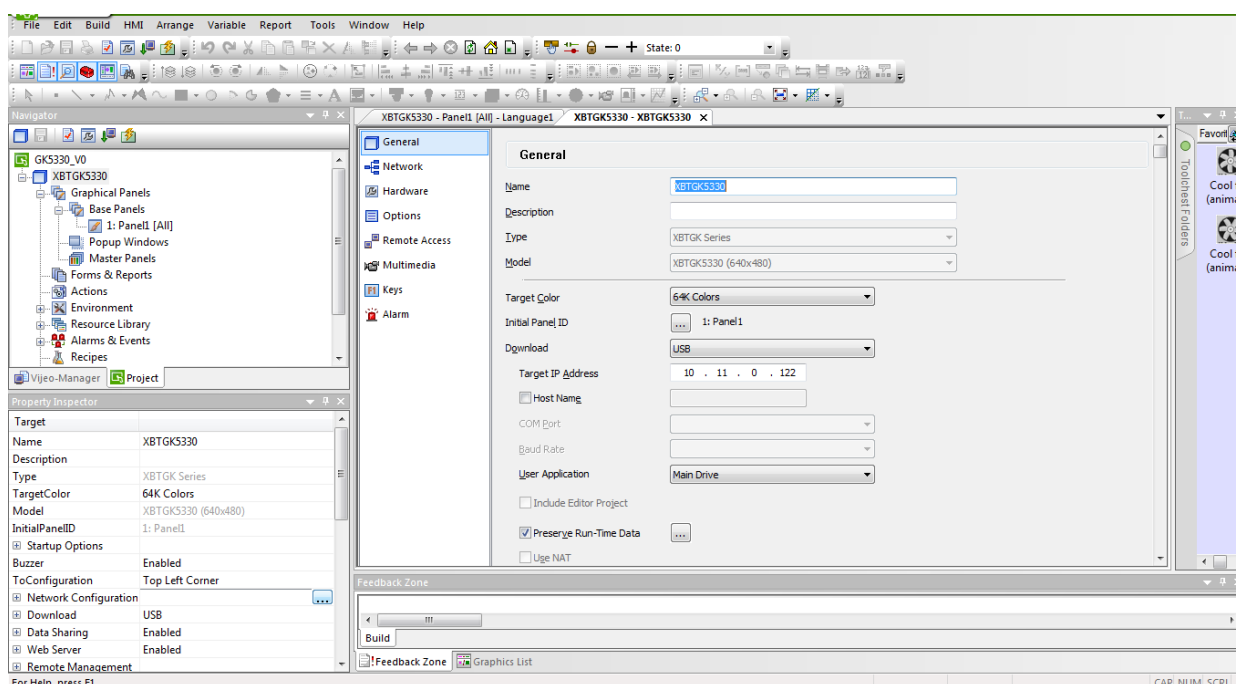


Рис. 6.11 - Налаштування змінних та IP-адреси

Для завантаження мобільного додатку необхідно в Google Play знайти Owen Cloud та встановити на мобільний пристрій (рис. 6.12).

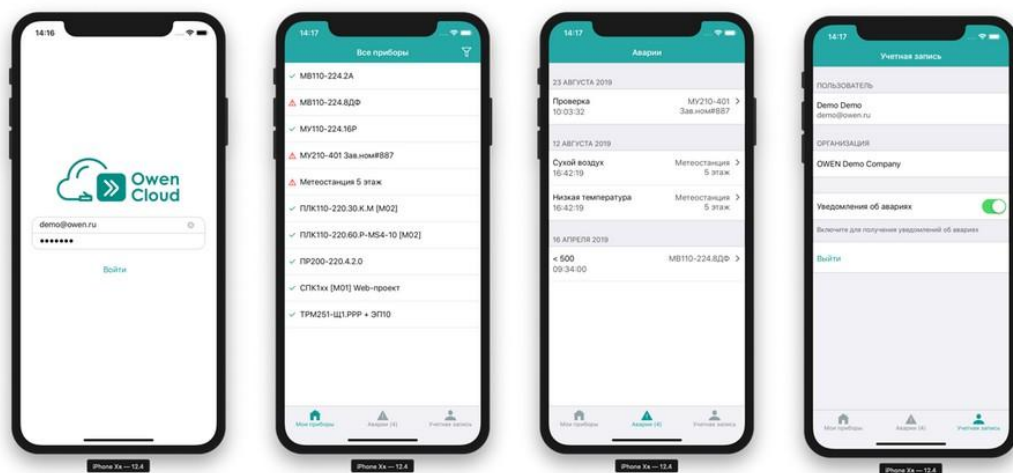


Рис. 6.12 – Налаштування мобільного додатку

РОЗДІЛ 7. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

7.1 Складання кошторису витрат на обслуговування обладнання метантенку.

Для планування обслуговування метантенка спочатку потрібно скласти перелік необхідного обладнання та комплектуючих.

Таблиця 7.1

Перелік поточної потреби у обладнанні та комплектуючих на метантенку

Найменування обладнання	Кількість
ПЛК 200 «Овен»	1
МВ110-1ТД	1
Автоматичний міліамперметр КСУ-2-004	2
ТСМ 50	3
«Regada ST 0.1»	2
Щит шкафний,	1

Кошторис – це фінансово-плановий документ, затверджений або прийнятий у встановленому порядку, який включає відповідні статті та суми витрат на утримання організацій і установ, а також на виробничу діяльність, капітальне будівництво та інші цілі.

Елементи витрат у кошторисах можуть включати:

- Матеріальні витрати;
- Оплата праці;
- Відрахування на соціальні заходи;
- Амортизація основних фондів і нематеріальних об'єктів;
- Інші витрати, виходячи з особливостей виробництва чи виконуваних робіт.

Таким чином, бюджет є базою для планування фінансування діяльності більшості підприємств. На підставі даних таблиці 6.1, актуальних ринкових цін на обладнання та комплектуючі, а також з урахуванням норм трудовитрат на окремі види електромонтажних робіт, складається кошторис на обслуговування електрообладнання метантенку.

Таблиця 7.2

Кошторис на обслуговування метантенку

Найменування обладнання	Кількість, од.	Вартість одиниці, грн.	Сумарна вартість, грн.	Трудомісткість, люд./год.
1	2	3	4	5
ПЛК 200 «Овен»	1	16 600	16 600	15
МВ110-1ТД	1	4000	4000	13
ТСМ 50	1	500	500	28
«Regada ST 0.1»	3	15500	15 500	34
Щит шкафний, ПК-К 2200*1200*600	1	3200	3200	39
Разом			39 800	129
ЗП основним робітникам			14 897,53	
ЄСВ			3 356,15	
Всього прямі витрати			58 053,68	
Накладні витрати (8.7% від прямих витрат)			5 050,7	
Разом прямі витрати+накладні витрати			63 104,38	
Плановані накопичення (8% від прямих та накладних витрат)			5 048,35	
Кошторисна вартість			68 152,37	

Таким чином, для поточного обслуговування електрообладнання метантенку потрібно: 68 152,37 грн.

Висновки

В рамках цього дипломного проекту було розроблено систему автоматичного регулювання температурного режиму процесу анаеробного бродіння субстрату в метантенку.

Основна мета системи — підтримувати стабільну температуру субстрату, що сприяє оптимальним умовам для ферментації.

Для аналізу динамічних характеристик метантенка було створено імітаційну модель за допомогою програм Mathcad та Simulink Matlab. Після вивчення літературних джерел розроблено функціональну, структурно-алгоритмічну та принципову електричну схеми для автоматичного керування температурою в метантенку.

З урахуванням особливостей технологічного процесу було вирішено застосувати пропорційно-інтегрально-диференційний (PID) регулятор для керування системою. Для реалізації PID-регулювання використовувався контролер ПЛК200.

Результати впровадження PID-регулятора показали, що система відповідає сучасним вимогам якості. Перехідний процес характеризується повною відсутністю коливань ($n = 0$), що забезпечує плавність регулювання. Відсутність перерегулювання ($\sigma = 0$) свідчить про те, що регульована величина не перевищує встановлене значення. Також статична похибка ($\delta = 0\%$) дорівнює нулю, що вказує на високу точність підтримання температури. Час регулювання (T) становить 1450 секунд, що свідчить про швидке досягнення необхідного рівня температури.

Таким чином, використання PID-регулятора на основі ПЛК200 дозволило досягти високих показників якості системи автоматичного регулювання температури субстрату в метантенку, що відповідає сучасним технологічним вимогам.

Список використаних джерел

1. Магнітні пускачі [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studopedia.org/4-100828.html>
2. Монтаж електромагнітного (соленоїдного) клапана [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://ic.danfoss.ru/products/klapany/montazh_elm_kl.html
3. Організація і підготовка монтажних робіт [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studfiles.net/preview/5207891/>
4. ОВЕН. Технічна документація та керівництво користувача для контролера ПЛК200. ОВЕН, 2023.
5. MathWorks. MATLAB та Simulink: Керівництво з моделювання систем автоматизації. MathWorks, 2022.
6. А. Іваненко, І. Сидоренко. "Теорія автоматичного керування". Навчальний посібник, Київ, 2020.
7. В. Петров. "Системи автоматизації біогазових установок". Видавництво технічної літератури, Львів, 2021.
8. ДСТУ EN 61508. "Функціональна безпека електричних, електронних та програмованих систем контролю та автоматизації". Державний стандарт України, 2019.
9. С. Мельник, Р. Ткаченко. "Проектування систем автоматичного регулювання для біогазових реакторів". Харків, 2021.
10. К. Біловол. "Аналіз та синтез систем регулювання з PID-регуляторами". Журнал "Автоматизація та моделювання", випуск 7, 2022.
11. О. Ковальчук. "Анаеробне бродіння та його вплив на виробництво біогазу". Науково-технічний журнал "Енергетика та ресурси", 2020.
12. М. Степаненко. "Методи моделювання динамічних систем у Mathcad". Видавництво технічної літератури, Київ, 2022.
13. Qian, S.; Chen, L.; Xu, S.; Zeng, C.; Lian, X.; Xia, Z.; Zou, J. Research on Methane-Rich Biogas Production Technology by Anaerobic Digestion Under

Carbon Neutrality: A Review. *Sustainability* **2025**, *17*, 1425.
<https://doi.org/10.3390/su17041425>

14. Yoshida, K., Shimizu, N. Biogas production management systems with model predictive control of anaerobic digestion processes. *Bioprocess Biosyst Eng* **43**, 2189–2200 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00449-020-02404-7>
15. Сайт компанії AQteck. <https://aqteck.ua/>
16. Програмовані логічні контролери ПЛК-200.
<https://aqteck.ua/ua/programovani-logichni-kontrolery/plk200-programovanyj-logichnyj-kontroler>