

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Навчально-науковий
інститут електроенергетики
(навчально-науковий інститут)
Факультет інформаційних технологій
(факультет)
Кафедра інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА кваліфікаційної роботи ступеня магістра

Здобувача вищої освіти Кириченка Владислава Євгеновича
(ПІБ)
академічної групи 123М-24-1
(шифр)
спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(код і назва спеціальності)
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерна інженерія»
(офіційна назва)

на тему «Обґрунтування структури та параметрів кіберфізичної системи ділянки
дріжджових реакторів на лінії з виготовлення спирту»
(назва за наказом ректора)

| Керівники | Прізвище, ініціали | Оцінка за шкалою | | Підпис |
|--------------------------------------|--------------------|------------------|---------------|--------|
| | | рейтинговою | інституційною | |
| кваліфікаційної роботи | доц. Ткаченко С.М. | | | |
| розділів: | | | | |
| синтез системи | доц. Ткаченко С.М. | | | |
| розроблення програмного забезпечення | доц. Ткаченко С.М. | | | |
| Рецензент | | | | |
| Нормоконтролер | проф. Цвіркун Л.І. | | | |

Дніпро
2025

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
інформаційних
технологій та
комп'ютерної інженерії
 (повна назва)

_____ В.В. Гнатушенко

« _____ » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістра

здобувача вищої освіти Кириченко В.Є. академічної групи 123М-24- 1
 (прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

за освітньою-професійною програмою «Комп'ютерна інженерія»
 (офіційна назва)

на тему «Обґрунтування структури та параметрів кіберфізичної системи ділянки
дріжджових реакторів на лінії з виготовлення спирту»,
 затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 17 жовтня 2025 р.
 №1388-с

| Розділ | Зміст | Термін виконання |
|-------------------------------------|--|------------------|
| Стан питання та постановка завдання | На основі матеріалів практик, технологічних регламентів, науково-технічних джерел сформулювати наукове завдання, конкретизувати об'єкт, предмет, мету та задачі дослідження. Виконати аналіз технологічного процесу дріжджових реакторів та чинних методів управління. | 11.10.2025 |
| Теоретичний | Обґрунтувати теоретичні основи керування ферментаційними процесами. Проаналізувати режими роботи дріжджових реакторів, параметри, що впливають на ефективність бродіння, та підходи до їх автоматизації. Сформулювати модель ситуаційного управління. | 25.10.2025 |
| Синтез системи | Розробка структурної та функціональної схем кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів. Вибір комплексу технічних засобів, каналів збору даних та виконавчих механізмів. Синтез принципової схеми автоматизації. | 15.11.2025 |
| Розроблення ПЗ | Розробити програмне забезпечення для моніторингу та управління технологічними параметрами дріжджових реакторів. Реалізувати алгоритми аналізу даних, ситуаційного управління та НМІ-інтерфейс. | 29.11.2025 |
| Експериментальний розділ | Провести перевірку працездатності алгоритмів, оцінити адекватність моделі управління, проаналізувати результати експериментів та ефективність кіберфізичної системи в умовах виробничого процесу. | 06.12.2025 |

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

доц. Ткаченко С.М.

(ініціали, прізвище)

Дата видачі

06 вересня 2025 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії

10.12.2025 р.

Прийнято до виконання

Кириченко В.Є.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 90 с., 22 рис., 17 табл., 2 дод., 24 джерел.

Об'єкт дослідження: кіберфізична система керування параметрами технологічного процесу на ділянці дріжджових реакторів у виробництві етилового спирту.

Мета: обґрунтувати структуру та параметри кіберфізичної системи автоматизованого контролю і керування дріжджовими реакторами на лінії з виготовлення спирту.

У вступі показано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, обґрунтовано необхідність впровадження систем у спиртове виробництво та застосовані методи дослідження.

У розділі «Стан питання і постановка задачі» розглянуто технологічний процес виготовлення спирту, роль ділянки дріжджових реакторів, проаналізовано чинні методи керування параметрами ферментації. Сформульовано мету, задачі, підзадачі, а також ідею побудови кіберфізичної системи.

У теоретичному розділі виконано аналіз режимів роботи дріжджових реакторів, досліджено вибір технологічних параметрів (температури, тривалості ферментації, рН, аерації), проаналізовано вимоги до процесу вирощування дріжджів. Синтезовано модель ситуаційного управління параметрами технологічного процесу.

У розділі «Синтез системи» розроблено структурну схему кіберфізичної системи, визначено функціональні підсистеми, засоби вимірювання, виконавчі механізми та побудована принципова схема автоматизації.

У розділі «Розроблення програмного забезпечення» створено програмне забезпечення для автоматизованого моніторингу і керування технологічними параметрами дріжджових реакторів, реалізовано алгоритми обробки даних і ситуаційного прийняття рішень.

В експериментальному розділі досліджено коректність побудованої моделі управління, перевірено працездатність алгоритмів ситуаційного керування та проаналізовано ефективність роботи системи.

Ключові слова: КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ДРІЖДЖОВИЙ РЕАКТОР, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ФЕРМЕНТАЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСУ - автоматизована система управління;

КФС - кіберфізична система;

АС - автоматизована система;

АПК - автоматизований програмний комплекс;

ПЛК (PLC) – програмований логічний контролер;

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition, система диспетчерського керування та збору даних;

HMI / LMI – Human-Machine Interface / людино-машинний інтерфейс;

АРМ – автоматизоване робоче місце;

PID-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор;

PV (Process Variable) – вимірюване значення технологічного параметра;

SP (Set Point) – задане (уставне) значення параметра;

CV (Control Variable) – керуючий вплив;

I/O – вхідні та вихідні сигнали;

AI / AO – аналоговий вхід / аналоговий вихід;

DI / DO – дискретний вхід / дискретний вихід;

HV – керований клапан;

PP – компресор або пристрій подачі повітря;

Pt100 – платиновий термометр опору;

pH – водневий показник кислотності середовища;

T – температура, °C або K;

p – тиск, МПа;

L – рівень рідини, % або м;

Q – витрата середовища, м³/год;

V_f – швидкість ферментації, г/год·л;

V_{max} – максимальна швидкість ферментації;

E_a – енергія активації реакції, кДж/моль;

R – універсальна газова стала;

t – час, год;

t_{opt} – оптимальна тривалість циклу ферментації, год;

S_0, S_k – початкова та кінцева концентрації цукрів, г/л;

X_0 – початкова концентрація біомаси дріжджів, г/л;

μ_{max} – максимальна питома швидкість росту дріжджів, год⁻¹;

°C – градус Цельсія;

K – кельвін;

MПа – мегапаскаль;

м³/год – кубічний метр за годину;

мг/л – міліграм на літр;

г/л – грам на літр;

% об. – відсоток об'ємний;

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 9 |
| 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ..... | 10 |
| 1.1 Огляд сфери та умов застосування системи..... | 10 |
| 1.2 Опис процесу виготовлення спирту..... | 11 |
| 1.3 Роль ділянки дріжджових реакторів у процесі виробництва..... | 13 |
| 1.4 Огляд і характеристика об'єкта впровадження..... | 14 |
| 1.5 Фізична структура дріжджоростильних апаратів та системи обслуговування..... | 16 |
| 1.6 Принципи керування технологічним процесом..... | 19 |
| 1.7 Аналіз призначення та методів керування параметрами управління ділянкою дріжджових реакторів..... | 20 |
| 1.8 Аналіз методів управління об'єктом автоматизації..... | 21 |
| 1.9 Постановка задачі..... | 23 |
| 2 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ..... | 24 |
| 2.1 Аналіз обладнання ділянки дріжджових реакторів..... | 25 |
| 2.2 Аналіз режимів роботи дріжджоростильних апаратів..... | 25 |
| 2.3 Аналіз вимог до процесу вирощування дріжджів..... | 27 |
| 2.4 Аналіз процесу вибору температурних параметрів реактора..... | 30 |
| 2.5 Аналіз процесу вибору тривалості циклу ферментації..... | 32 |
| 2.6 Синтез моделі управління дріжджовими реакторами..... | 35 |
| 2.6.1 Вимоги до методу розв'язання задачі..... | 35 |
| 2.6.2 Граф станів..... | 35 |
| 2.6.3 Математична модель..... | 37 |
| 3 СИНТЕЗ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ..... | 38 |
| 3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів..... | 39 |
| 3.2 Розробка принципової схеми комплексу технічних засобів..... | 41 |
| 3.2.1 Аналіз входів та виходів системи..... | 41 |
| 3.2.2 Обґрунтування елементної бази системи..... | 45 |

| | |
|--|----|
| 3.2.3 Реалізація принципової схеми кіберфізичної системи | 51 |
| 4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ | 52 |
| 4.1 Призначення та область застосування програмного забезпечення | 52 |
| 4.2 Логічна структура керування | 52 |
| 4.3 Обґрунтування технічних характеристик програмного забезпечення | 54 |
| 4.4 Опис розробленої програми | 55 |
| 4.4.1 Загальні відомості | 56 |
| 4.4.2 Функціональне призначення | 56 |
| 4.4.3 Опис логічної структури | 56 |
| 4.4.4 Використані технічні засоби | 57 |
| 4.4.5 Вхідні та вихідні дані | 57 |
| 4.4.6 Виклик та завантаження | 60 |
| 5 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ | 62 |
| 5.1 Формування вимог до експерименту | 62 |
| 5.2 Підготовка експерименту | 62 |
| 5.3 Контрольний приклад для проведення | 63 |
| 5.3.1 Підготовчі операції | 64 |
| 5.3.2 Дослідження алгоритму керування температурою та клапаном охолодження | 65 |
| 5.3.3 Дослідження алгоритму керування рівнем суспензії та насосом циркуляції | 67 |
| 5.3.4 Дослідження алгоритму контролю рН та дозування луку | 68 |
| 5.3.5 Дослідження алгоритму контролю розчиненого кисню | 69 |
| 5.3.6 Дослідження клапану тиску у реакторі | 69 |
| 5.3.7 Дослідження роботи алгоритму формування аварійного сигналу | 70 |
| 5.3.8 Дослідження роботи розробленого алгоритму автономного керування біореактором | 72 |
| 5.4 Аналіз результат експерименту | 75 |
| ВИСНОВОК | 76 |

| | |
|-----------------------|----|
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... | 78 |
| ДОДАТОК А..... | 81 |
| ДОДАТОК Б..... | 83 |

ВСТУП

Сучасна спиртова промисловість України розвивається в умовах інтенсифікації виробництва та впровадження цифрових технологій, спрямованих на підвищення ефективності, стабільності технологічних процесів і якості кінцевої продукції. Керування процесами традиційними методами характеризується обмеженою адаптивністю та значною залежністю від людського фактора. Нелінійність процесів, змінність властивостей сировини та дріжджових культур ускладнюють підтримання оптимальних режимів роботи реакторів і знижують стабільність технологічного процесу. Перспективним напрямом підвищення ефективності роботи дріжджових реакторів є впровадження кіберфізичних систем.

Об'єктом дослідження є ділянка дріжджових реакторів на лінії з виготовлення спирту.

Предметом дослідження є структура та параметри кіберфізичної системи керування ділянкою дріжджових реакторів.

Ідея магістерської роботи полягає в підвищенні ефективності та стабільності процесів шляхом обґрунтування раціональної структури та параметрів кіберфізичної системи, адаптованої до умов роботи дріжджових реакторів.

Метою магістерської роботи є обґрунтування структури та параметрів кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів на лінії з виготовлення спирту.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати технологічний процес роботи ділянки дріжджових реакторів, дослідити методи автоматизованого керування параметрами ферментації, обґрунтувати структуру кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів, визначити параметри технічних і програмних засобів системи керування, оцінити ефективність запропонованих рішень шляхом моделювання та випробувань.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Огляд сфери та умов застосування системи

Спиртова промисловість є однією з провідних і найрозвиненіших галузей з високим рівнем науково-технічного забезпечення. Основна продукція цієї сфери - етиловий спирт - широко застосовується у виробництві лікеро-горілчаних напоїв, для зміцнення вин, а також у парфумерії, косметичній та кондитерській промисловості. Крім того, спирт використовується для виготовлення оцту, у фармацевтичній галузі, медицині та технічних цілях.

В Україні спиртове та лікеро-горілчане виробництво займає важливе місце в структурі харчової промисловості. Для цієї галузі характерні значні обсяги випуску продукції та широкий її асортимент, що зумовлено суспільними потребами, різноманітністю господарських напрямів, а також смаками й вподобаннями споживачів. Сучасний розвиток галузі орієнтований на інновації, зокрема на підвищення ефективності виробництва шляхом раціонального використання сировини, покращення якості продукції, зменшення негативного впливу на довкілля та впровадження технологій автоматизації. [1]

Виробництво етилового спирту в Україні належить до важливих напрямів харчової та біотехнологічної промисловості. Основні підприємства, такі як ДП «Укрспирт» використовують сучасні технологічні лінії з глибинним анаеробним бродінням на основі дріжджових культур. Ключовою частиною технологічного процесу є ділянка дріжджових реакторів (ферментерів), у якій відбувається основне перетворення сировини на спирт. Саме від стабільності та керованості цього процесу залежить продуктивність і якість кінцевої продукції.

Процес бродіння триває від 48 до 72 годин і потребує постійного контролю низки параметрів:

- температури (32-35 °C);
- рівня рН (4,5-5,2);
- концентрації цукрів;

- концентрації спирту;
- концентрації розчиненого кисню.

Вихід будь-якого параметра за допустимі межі призводить до зниження ефективності, втрати сировини або повної зупинки технологічного циклу. У практиці заводів часто спостерігаються ситуації, коли через затримку реагування або несправність системи охолодження температура у реакторі перевищує критичний рівень, що викликає деградацію дріжджів і погіршення якості продукту.

Важливу роль у забезпеченні стабільності процесу відіграють системи теплообміну - контури циркуляції охолоджувальної води або гліколю, які повинні працювати синхронно із загальною енергетичною схемою заводу. Недостатня ефективність теплообмінників або відсутність адаптивного керування призводить до перегріву або переохолодження середовища, що впливає на якість і безпеку процесу.

На багатьох вітчизняних підприємствах контроль параметрів досі здійснюється вручну: оператори періодично вимірюють температуру, рН і щільність, а потім вручну коригують подачу охолодження чи живлення. Такий підхід є малоефективним, оскільки не дозволяє реагувати на швидкі зміни параметрів у режимі реального часу, що підвищує ризик збоїв у технологічному процесі та збільшує енерговитрати.

Таким чином, ділянка дріжджових реакторів є складним об'єктом автоматизації, у якому взаємодіють різні фізичні, хімічні та технічні фактори. Для підвищення ефективності виробництва виникає необхідність правильної структури та створення сприятливих параметрів для кіберфізичної системи - в чому і полягає тема кваліфікаційної роботи.

1.2 Опис процесу виготовлення спирту

Виготовлення спирту є складним багатостадійним технологічним

процесом, який включає кілька ключових етапів, кожен з яких має важливе значення для отримання високоякісного продукту. Цей процес починається з підготовки сировини і завершується очищенням та розливом готового спирту.

На початковому етапі виготовлення спирту важливо правильно підготувати сировину. Зазвичай використовується зерно, таке як пшениця, жито або кукурудза. Сировину очищують від сторонніх домішок і шкідників, після чого подрібнюють до однорідного стану. Подрібнення здійснюється за допомогою спеціальних млинів, які забезпечують максимальну площу поверхні для подальших процесів гідролізу.

Другий етап - затирання, під час якого подрібнене зерно змішується з водою і нагрівається. Це дозволяє розщепити крохмаль, який міститься у зерні, на прості цукри. В результаті отримується затор - суміш води і розчинених цукрів, яка є основою для подальшого бродіння. Процес затирання відбувається при контрольованих температурах і триває кілька годин.

Третій етап - ферментація яка являє собою один з найважливіших етапів у виробництві спирту. Підготовлений затор перекачується у дріжджові реактори, де до нього додають спеціальні культурні дріжджі. Ці мікроорганізми перетворюють цукри на етиловий спирт і вуглекислий газ. Ферментація триває від кількох днів до тижня, залежно від використовуваної технології і характеристик сировини. Протягом цього процесу важливо ретельно контролювати температуру і рівень рН, щоб забезпечити оптимальні умови для діяльності дріжджів.

Після завершення ферментації отриманий продукт, який називається брага, підлягає дистиляції. Дистиляція дозволяє відокремити спирт від інших компонентів браги шляхом випаровування і конденсації. Спочатку проводиться первинна дистиляція, під час якої брага нагрівається до температури, за якої випаровується етиловий спирт. Пари спирту збираються і конденсуються у спеціальних охолоджувачах, отримуючи сиру спиртову фракцію. Для отримання високоякісного продукту цей процес повторюється кілька разів у ректифікаційних колонах.

Ректифікація є ключовим етапом, що дозволяє досягти необхідної чистоти спирту класу "Люкс". Під час ректифікації спиртовий розчин проходить через кілька секцій колон, де відбувається послідовне випаровування і конденсація. Цей процес дозволяє відокремити небажані домішки, такі як метанол, ацетон та інші леткі компоненти, які негативно впливають на якість продукту. У результаті отримується високоякісний спирт із концентрацією етилового спирту до 96,6%.

Фінальним етапом виробництва є очищення і стабілізація готового спирту. Спирт піддається додатковій обробці для видалення залишкових домішок і досягнення необхідних органолептичних характеристик. Зазвичай використовуються методи активованого вугілля, іонообмінних смол або ультрафільтрації. Після цього спирт розводиться до необхідної концентрації і розливається у спеціальні контейнери для подальшого зберігання і транспортування.

1.3 Роль ділянки дріжджових реакторів у процесі виробництва

Ділянка дріжджових реакторів є однією з ключових складових виробничої лінії з виготовлення етилового спирту. Саме на цьому етапі відбувається процес ферментації, під час якого сировина яка містить цукор під дією дріжджових клітин перетворюється на етиловий спирт і побічні продукти - вуглекислий газ, тепло та інші сполуки. Ефективність цього процесу визначає не лише кількість отриманого спирту, а й стабільність та якість кінцевого продукту. [2] Процес ферментації, який реалізується в дріжджових реакторах, є складним біохімічним процесом, що включає низку взаємопов'язаних стадій. На початковому етапі підготовлена сировина подається до реактора, де створюються оптимальні умови для активації та розмноження дріжджових клітин. У процесі метаболізму дріжджі споживають цукри, продукуючи спирт і вуглекислий газ. Для забезпечення максимальної продуктивності необхідний точний контроль параметрів середовища, таких як температура, рівень рН, ступінь аерації, концентрація субстрату та інші показники. [3]

Контроль технологічних параметрів має вирішальну роль у підтриманні стабільності процесу ферментації. Наприклад, відхилення температури від оптимального діапазону може призвести до зниження активності дріжджів або їх часткової загибелі, що безпосередньо впливає на вихід етилового спирту. Аналогічно, зміна рівня рН впливає на ферментативну активність, а порушення режиму аерації може спричинити недостатнє насичення культури киснем або накопичення вуглекислого газу, що негативно позначається на метаболічній активності клітин.

Система аерації на ділянці дріжджових реакторів виконує подвійну функцію: забезпечує подачу кисню для підтримання життєдіяльності дріжджів на початковій стадії ферментації та сприяє ефективному видаленню надлишків вуглекислого газу. Для досягнення оптимальних умов ці процеси мають бути інтегровані в єдину систему автоматичного керування, здатну реагувати на зміни технологічних параметрів у реальному часі.

Отже, ділянка дріжджових реакторів є центральною ланкою у виробництві спирту, а застосування кіберфізичних систем у її структурі дозволяє підвищити ефективність, стабільність і керованість процесу ферментації.

1.4 Огляд і характеристика об'єкта впровадження

Виробництво етилового спирту є однією з базових галузей харчової промисловості України, що забезпечує сировиною лікєро-горілчану, харчову, фармацевтичну та хімічну промисловість. Харчовий етиловий спирт виробляється виключно з натуральної харчової сировини - переважно з зернових культур (пшениця, кукурудза, жито) або цукровмісних продуктів (меляса, цукрові буряки). [2] На відміну від харчового спирту, технічний спирт одержують з деревини або нафтопродуктів шляхом кислотного гідролізу. Він містить значну кількість шкідливих домішок (метанолу, альдегідів, сивушних масел), що робить його непридатним для харчового використання. [4]

Технологічна схема глибокої переробки зерна з метою отримання етилового спирту включає такі основні етапи:

- Приймання та зберігання сировини - технічне зерно, некондиційна картопля або відходи деревини проходять очищення, сушіння та зважування;
- Подрібнення сировини - забезпечує підвищення площі контакту ферментів із крохмалем;
- Отримання крохмального молочка - для сировини, що містить крохмаль, виконується стадія розчинення та розщеплення крохмалю на декстрини та цукри;
- Вирощування дріжджів - створення біомаси активних дріжджів для подальшого бродіння;
- Бродіння сусла - перетворення цукрів на етиловий спирт у дріжджових реакторах;
- Відгонка спирту - виділення та концентрування спирту-сирцю;
- Ректифікація та очищення - отримання спирту необхідної чистоти;
- Скраплення та утилізація побічних продуктів - вуглекислий газ, метан. [5]

Одним із найбільш важливих елементів технологічного ланцюга є ділянка вирощування дріжджів, адже саме якість посівного матеріалу визначає стабільність і швидкість подальшої ферментації. Для цього використовують дріжджові та дріжджерозмножувальні апарати, конструкція яких забезпечує оптимальні умови росту дріжджів.

Дріжджерозмножувальні апарати застосовуються переважно у виробництві хлібопекарських дріжджів, тоді як у спиртовому виробництві використовуються дріжджові апарати періодичної дії, конструктивно виконані як герметичні циліндроконічні ємності. Вони оснащені зміювиками для стерилізації середовища парою, охолодження сусла, а також системами перемішування - мішалками або барботерами для подачі стисненого повітря. Повітря проходить попереднє очищення в біофільтрі, що запобігає мікробіологічному зараженню культури. Оптимальна витрата повітря становить 0,4 - 1 м³/хв на 1 м² вільної поверхні рідини. [6]

Місткість дріжджового апарата становить близько 6-8 % від об'єму основного бродильного апарата, коефіцієнт наповнення - 0,8. Так, для батареї типу БА-1 з об'ємом чана 2000 дал місткість дріжджового апарата становить 160

дал. [7]

На сучасних спиртових підприємствах України, зокрема при безперервному способі бродіння, застосовуються каскадні системи дріжджових апаратів, що забезпечують послідовне підготування біомаси для кожної стадії процесу. Такі системи потребують високої точності керування температурою, рН, подачею повітря та рівнем заповнення апаратів.

1.5 Фізична структура дріжджоростильних апаратів та системи обслуговування

На основі схеми дріжджоростильного апарату на рисунку 1.1 можна ідентифікувати кілька ключових приладів, що забезпечують ефективність і точність процесу ферментації.

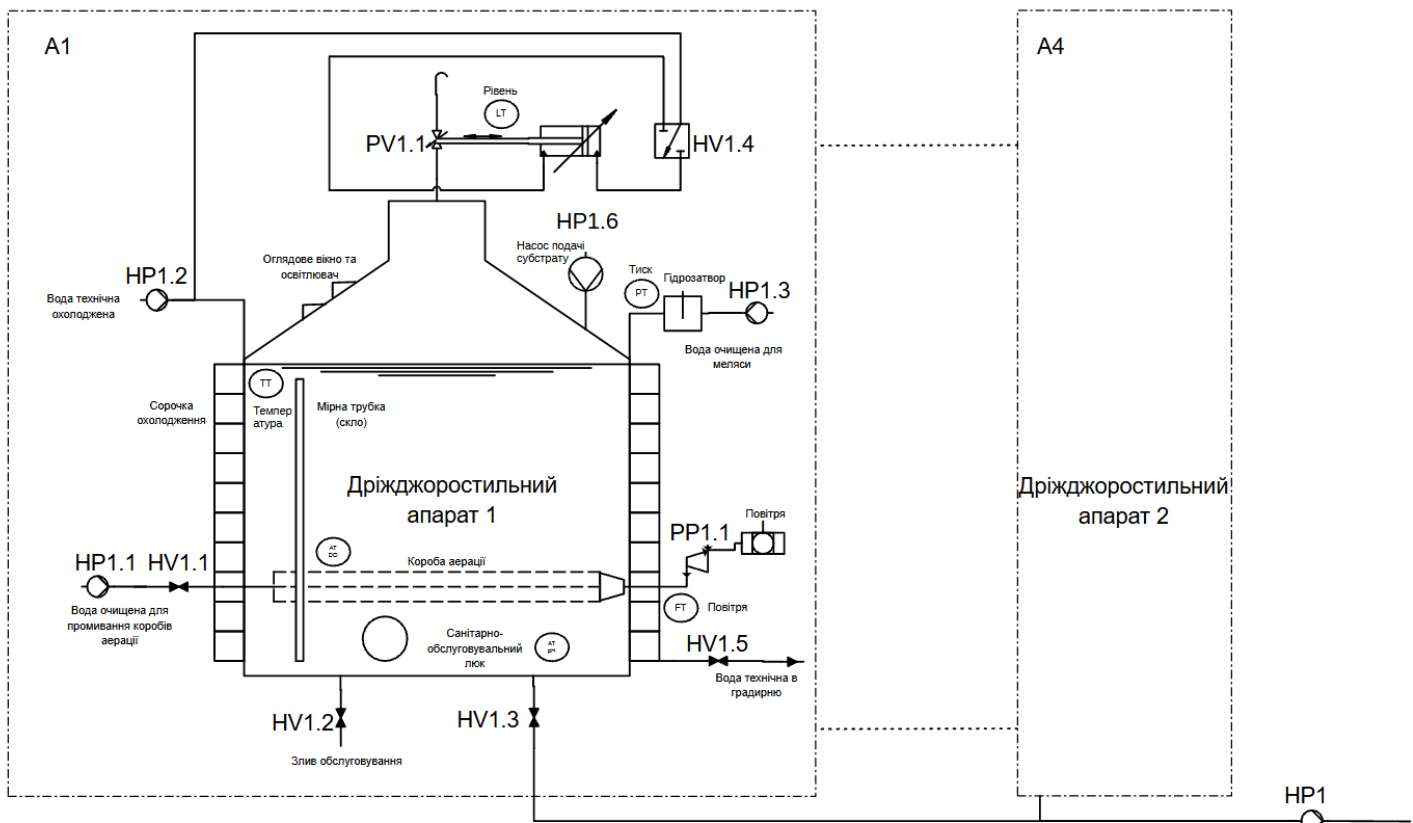


Рисунок 1.1 - Дріжджоростильних апарати та система обслуговування

1.5.1 Датчики температури

Температура є важливим параметром для процесу ферментації. Для контролю температури використовуються високоточні датчики, які дозволяють

підтримувати оптимальні умови для діяльності дріжджів. Використаємо Endress+Hauser iTHERM TM411 - точний датчик температури що зображений на рисунку 1.2, який забезпечує стабільність і надійність вимірювань. [8]



Рисунок 1.2 - Endress+Hauser iTHERM TM411

1.5.2 Датчики рівня

Для контролю рівня рідини в апараті використовуються датчики рівня, що забезпечують безперервний моніторинг рівню суспензії. Використаємо Siemens Sitrans LR250 - радарний датчик рівня що представлений на рисунку 1.3, який підходить для вимірювання рідини в різних промислових умовах. [9]



Рисунок 1.3 - Siemens Sitrans LR250

1.5.3 Датчики тиску

Датчики тиску необхідні для контролю тиску всередині апарату, щоб забезпечити безпеку та оптимальні умови для ферментації. Використаємо Rosemount 3051S датчик тиску з високою точністю, який підходить для різноманітних промислових застосування та представлений на рисунку 1.4. [10]



Рисунок 1.4 - Rosemount 3051S

1.5.4 Насоси

Подача субстрату до реакторів реалізується за допомогою дозувального насоса Grundfos DDA 12-10 який забезпечує стабільне та кероване введення поживного середовища. [11]

1.5.5 Системи управління клапанами

Подача повітря виконується через промисловий клапан аерації з аналоговим управлінням типу Bürkert 3280, який забезпечує плавне регулювання та хімічну стійкість. [12]



Рисунок 1.6 - Bürkert 3280

1.5.6 Модель датчику рН середовища

Endress+Hauser CPS1 1D - це датчик рН, який забезпечує точні вимірювання і сумісний з промисловими контролерами. [13]



Рисунок 1.7 - Endress+Hauser CPS1 1D

1.5.7 Система охолодження (сорочки охолодження)

Охолоджуючі сорочки використовуються для підтримання оптимальної температури всередині апарату. Вони забезпечують ефективне відведення тепла, яке виділяється під час ферментації.

1.6 Принципи керування технологічним процесом

Керування технологічним обладнанням здійснюється переважно вручну або в локальному автоматизованому режимі. Оператори здійснюють керування з місцевих пультів, а також безпосередньо з точок доступу до запірної арматури. Вмикання насосів, компресорів, мішалок та подача середовища дозволяється лише за умови, що приймальні ємності не перебувають у стані аварійного переповнення або підвищеного тиску.

Процес культивування дріжджів, який охоплює етапи підготовки сусла, аерації, підтримання температурного режиму та контролю рН, здійснюється оператором дріжджового відділення у взаємодії з черговим електромеханіком. Вони забезпечують виконання технологічних операцій відповідно до заданих параметрів, отриманих із лабораторних аналізів або з центрального пункту керування.

Загальне управління технологічним процесом здійснює технолог ділянки,

який базує свої рішення на результатах оперативного контролю параметрів середовища, даних сенсорів та лабораторних показниках активності дріжджів. Такий підхід забезпечує стабільність якості дріжджової маси, однак має обмежену оперативність і залежить від людського фактору. Технологічне обладнання дріжджової секції має чітко визначену послідовність операцій, які наразі можуть виконуватися в ручному або в частково автоматизованому режимі. У складі реакторів передбачено повний набір вимірювальних приладів та клапанів, насосів і виконавчих механізмів, що може створити технічну основу для побудови сучасної кіберфізичної системи автоматичного керування процесом культивування дріжджів.

1.7 Аналіз призначення та методів керування параметрами управління ділянкою дріжджових реакторів

Для ефективного протікання процесу ферментації на ділянці необхідно забезпечити стабільні умови життєдіяльності дріжджових клітин. Основними технологічними параметрами, що підлягають регулюванню, є температура середовища, рівень рН, швидкість подачі поживного субстрату, інтенсивність аерації та тиск у реакторі. Від точності підтримання цих параметрів залежить активність дріжджів, швидкість метаболічних реакцій та кінцева якість спирту.

На більшості вітчизняних спиртових підприємств оператор задає режими роботи реакторів за даними лабораторного аналізу суслу та температурних вимірювань. Такий підхід не враховує динамічні збурення, пов'язані зі змінами складу сировини, коливаннями температури охолоджувальної води або тиску подачі повітря. Унаслідок цього можливі відхилення від оптимальних умов ферментації, що призводить до уповільнення процесу або підвищення енергоспоживання.

Традиційно основним каналом зворотного зв'язку в процесі управління є результати лабораторного контролю - визначення концентрації спирту, цукрів та кислотності зразків бродильного середовища. Такий метод має суттєвий недолік - він не дозволяє здійснювати оперативну корекцію параметрів, оскільки аналіз

здійснюється з часовою затримкою. Відтак оператор вимушений приймати рішення постфактум, часто покладаючись на досвід.

Впровадження на ділянці дріжджових реакторів вимірювальних засобів у реальному часі дозволяє здійснювати безперервний моніторинг стану середовища. Це створює передумови для реалізації автоматичного управління, у яких регулятори підтримують стабільні параметри процесу відповідно до заданих уставок.

Однак, навіть у разі впровадження класичних автоматизованих систем, залишається проблема адаптивності управління. Характеристики бродильного середовища змінюються в часі під впливом як внутрішніх чинників (зміни концентрації субстрату, накопичення продуктів метаболізму, зміна поведінки популяції дріжджів), так і зовнішніх збурень (коливання параметрів живлення, зміни температури охолоджувальної води, варіації якості сировини). Тому для забезпечення стабільної та оптимальної роботи ділянки необхідні не лише засоби безперервного моніторингу, а й алгоритми управління, що володіють адаптивністю й стійкістю до збурень.

1.8 Аналіз методів управління об'єктом автоматизації

Керування обладнанням ділянки дріжджових реакторів пов'язане з переведенням системи між різними технологічними станами. Дріжджові апарати з точки зору управління мають подібну структуру режимів і можуть перебувати у таких стандартних станах:

1. Очищення та дезінфекція - зливні клапани відкриті, насос подачі дріжджового розчину, охолодження, подачі сусли, патоки та води вимкнені. Компресор подачі повітря вимкнений, а подача пари активна. Відкриті клапани прогріву реактора та парової обробки поверхонь, триває цикл очищення (30 хв). Насос-дозатор кислоти вимкнений.

2. Заправлення реактора - злив закритий, активуються насоси подачі патоки, води або дріжджів. Компресор повітря увімкнений, подача пари вимкнена, задвижки прогріву закриті. Система контролює час заповнення

реактора, насос-дозатор кислоти не працює.

3. Заливка сусла - злив закритий, насоси подачі сусла та води активні, компресор повітря подає стиснуте повітря для насичення середовища, подача пару вимкнена. Насос-дозатор кислоти вимкнутий до досягнення заданого рівня заповнення.

4. Введення каталізатора - всі зливи закриті, компресор повітря працює, подача пару вимкнена. Активується насос-дозатор кислоти, який підтримує кислотність до певного рівня рН.

5. Культивування дріжджів - злив закритий, температура регулюється насосом охолодження відповідно до вказівок. Аерація здійснюється періодично для інтенсифікації процесу, подача пари вимкнена. Система контролює кислотність середовища та температуру для підтримання оптимальних умов.

6. Відбір напівфабрикату - всі клапани закриті, окрім задвижки відбору; насоси вимкнені. Відбір триває до моменту спрацювання нижнього рівневого датчика.

7. Простій - усі задвижки закриті, насоси вимкнені, спрацьовує датчик нижнього рівня, сигналізуючи про готовність до наступного циклу.

Технологічні установки також проходять перехідні стани тривалістю близько 300 мс, під час яких здійснюються перемикання задвижок та насосів. У ці моменти решта параметрів не контролюється, що враховується системою керування. Усі інші нештатні стани розглядаються як аварійні та ініціюють аварійне відключення обладнання.

Таким чином, процес керування дріжджовими реакторами розділяється на автономні послідовні етапи, кожен з яких має власний набір умов переходу між станами. Система автоматизації повинна реалізовувати логіку переходів із урахуванням поточних показників температури, рН, тиску, рівня та часу процесу. Допускається часткова асинхронність між реакторами завдяки буферним місцям лінії.

1.9 Постановка задачі

Виробництво етилового спирту в Україні є складним багатостадійним процесом, важливою частиною якого є ділянка дріжджових реакторів. На цьому етапі відбувається ферментація - перетворення цукрів на етиловий спирт під дією дріжджових клітин. Ефективність цього процесу значною мірою визначає вихід і якість кінцевого продукту.

Однією з головних проблем сучасних спиртових підприємств є недостатній рівень автоматизації процесів керування параметрами дріжджових реакторів. Більшість операцій здійснюється вручну або в напівавтоматичному режимі, що не дозволяє враховувати динамічні зміни стану середовища, збурення та нелінійність біохімічних процесів. Через це виникають відхилення від оптимальних умов культивування дріжджів, підвищується енергоспоживання, знижується стабільність процесу та якість спирту.

Для забезпечення високої ефективності виробництва необхідно створити кіберфізичну систему управління ділянкою дріжджових реакторів, яка об'єднає підсистеми в єдиний інтегрований комплекс

Метою магістерської роботи є розробка кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів на лінії з виготовлення спирту.

Основною задачею магістерської роботи є розробка алгоритмів автоматизованого керування та логіки прийняття рішень для кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів на лінії з виготовлення спирту. Для вирішення цієї задачі необхідно вирішити ці підзадачі:

- провести аналіз методів керування й побудувати схему функціональної структури;
- виконати синтез технічного рішення на базі контроллера;
- розробити програмне забезпечення;
- отримати протокол випробування системи.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз обладнання ділянки дріжджових реакторів

Технологічний процес дріжджоростильного відділення є одним із ключових етапів виробництва етилового спирту, оскільки саме на цьому етапі формується активна біомаса дріжджів, необхідна для подальшого зброджування суслу. Від ефективності росту дріжджів залежить продуктивність спиртового виробництва, якість кінцевого продукту та стабільність технологічного циклу.

Дріжджоростильні апарати, згідно зі структурною схемою (рис. 1.1), являють собою вертикальні циліндричні резервуари, оснащені системами нагрівання, аерації, подачі поживного середовища, охолодження та контролю параметрів середовища. [14] Вони працюють у складі послідовно з'єднаної технологічної лінії, де кожен апарат виконує свою фазу процесу вирощування дріжджів: від підготовки посівного матеріалу до отримання дріжджової маси необхідної концентрації.

На верхній частині апарата встановлено датчики контролю рівня середовища, а також клапан, який забезпечує регулювання подачі живильного середовища або повітря. Через патрубки здійснюється подача води очищеної для змішування та компенсації втрат вологи. Наявність циркуляційного контуру забезпечує рівномірний розподіл температури та концентрації поживних речовин у всьому об'ємі апарата.

Знизу апарат обладнаний дренажним клапаном для зливу відпрацьованої рідини та вузлом, який може виконувати функції насоса подачі або рециркуляції середовища. Додаткові засувки дозволяють ізолювати апарат від інших технологічних вузлів або здійснювати очищення і санітарну обробку без зупинки всієї лінії.

Важливу роль відіграє система аерації, яка через спеціальні трубопроводи подає стиснене повітря в нижню частину апарата. Це забезпечує насичення середовища киснем, необхідним для інтенсивного росту дріжджових клітин. Разом із тим, надмірна аерація може призвести до пініння, тому необхідно підтримувати оптимальне співвідношення повітря і поживного середовища.

Робота дріжджоростильного апарата відбувається в декілька етапів. На стадії підготовки здійснюється промивка апарата, його стерилізація паром та перевірка герметичності арматури. Потім відбувається завантаження посівного матеріалу і подача поживного середовища певної температури. У цей момент важливо контролювати температуру, тиск і рівень рідини для запобігання термічному стресу дріжджів.

На основному етапі росту дріжджів система автоматизації забезпечує стабільність температури в межах 30-32 °С, контроль концентрації розчиненого кисню, а також підтримку рН у межах 4,5-5,0. Температура регулюється за допомогою подачі гарячої води через контур та регулювальні клапани. Ці параметри контролюються через контури автоматичного керування, які можуть працювати як у ручному, так і в автоматичному режимі.

Після завершення фази активного росту дріжджів відбувається охолодження середовища для зниження метаболічної активності та стабілізації клітин. Цей процес реалізується через зміну витрати охолоджуючої води, що проходить по теплообмінному контуру, і контролюється температурним датчиком.

Останнім етапом є злив готової дріжджової маси через дренаж у збірник, після чого апарат переходить у стан промивки або підготовки до нового циклу.

Аналіз структури й режимів роботи дріжджоростильного апарата показує, що процес є багатофакторним і динамічним. Він потребує постійного моніторингу та коригування параметрів для забезпечення стабільної біохімічної реакції. Найбільш критичними параметрами, що впливають на якість продукту, є температура, концентрація кисню, рН і час росту. Саме тому автоматизація цього процесу має першочергове значення — вона дозволяє зменшити вплив людського фактора, підвищити повторюваність результатів і забезпечити оптимальні умови культивування дріжджів у кожному циклі.

2.2 Аналіз режимів роботи дріжджоростильних апаратів

Дріжджоростильні апарати функціонують у кількох основних

технологічних режимах, які визначають послідовність виконання операцій, характер керування, а також рівень участі обслуговуючого персоналу. [15] Кожен режим має свої вимоги до параметрів середовища, систем керування та безпеки, а отже - до алгоритмів роботи автоматизованої системи. До режимів роботи відносяться:

- режим простою, все технологічне обладнання апарата вимкнене, робоче середовище відсутнє, а керування не здійснюється. Режим простою передбачає виконання профілактичних оглядів, технічного обслуговування арматури перевірку датчиків, а також оцінку готовності системи до подальшої роботи. Усі виконавчі механізми знаходяться в безпечному положенні, а живлення на основні контури автоматизації зняте.

- режим підготовки, коли персонал здійснює промивання та стерилізацію апарата, перевіряє цілісність трубопроводів і працездатність насосів. Проводиться тестування датчиків рівня, температури й тиску, а також контроль дренажних клапанів. Подача пари або гарячої води здійснюється вручну або через локальні контури керування. У цьому режимі оператор готує апарат до завантаження живильного середовища, задає початкові параметри та активує системи автоматики в режимі очікування.

- режим завантаження, коли починається подача попередньо підготовленого живильного середовища та посівного матеріалу в апарат. Контролюється рівень заповнення за допомогою датчика, а також відкриття клапанів. У цей момент важливим є точний контроль тиску й температури середовища, щоб уникнути теплового шоку дріжджів. Подача сировини може виконуватись у напівавтоматичному режимі, де оператор лише підтверджує готовність до наступного етапу.

- робочий режим, основний та найдоввший режим. В апараті відбувається інтенсивне розмноження дріжджових клітин за рахунок споживання поживних речовин і кисню. Автоматична система керування підтримує температуру в межах 30-32 °С, здійснює стабілізацію рН (через дозування нейтралізуючого розчину), а також регулює подачу повітря відповідно до сигналів з датчиків

концентрації кисню. Для цього використовуються замкнені контури керування із зворотним зв'язком. Рівень рідини в апараті контролюється постійно, щоб уникнути переповнення або недозавантаження. При відхиленні параметрів від технологічних меж система подає сигнал оператору або автоматично коригує режим. Для забезпечення рівномірності температурного поля періодично активується циркуляційний насос, що перекачує середовище через контур рециркуляції.

- режим стабілізації та охолодження, процес коли після досягнення заданої концентрації біомаси дріжджів температура середовища поступово знижується. Це робиться для зменшення швидкості метаболічних процесів і стабілізації стану клітин перед зливом. Керування температурою в цей період виконується автоматично - шляхом плавного регулювання витрати охолоджуючої води. Режим триває до досягнення оптимальних умов для зберігання культури.

- режим зливу, це процес коли після режиму стабілізації дріжджова маса вивантажується з апарата через дренажний клапан у приймальний резервуар. При цьому система контролює повноту зливу за сигналом рівня. Після завершення процесу апарат переходить у режим простою або повторно - у підготовчий цикл промивки.

З аналізу режимів роботи дріжджоростильних апаратів можна зробити висновок, що більшість операцій, які впливають на стабільність процесу, мають циклічний характер і піддаються алгоритмізації. Крім того, режими росту дріжджів вимагають постійного коригування параметрів температури, аерації та рівня рН залежно від характеристик конкретної культури. Саме тому необхідно реалізувати адаптивні алгоритми керування, здатні автоматично налаштовувати параметри регуляторів під кожен технологічний цикл.

2.3 Аналіз вимог до процесу вирощування дріжджів

Якість дріжджової біомаси, що надалі використовується у виробництві спирту, безпосередньо залежить від правильного вибору та підтримання режимів росту дріжджів у дріжджоростильних апаратах. На ефективність процесу

впливають температура середовища, концентрація поживних речовин, рівень рН, подача повітря та час культивування. Кожен із цих факторів потребує точного автоматизованого контролю для забезпечення стабільності процесу. Оптимальні параметри середовища визначають швидкість розмноження дріжджових клітин, їхню життєздатність і активність ферментативних систем. Перегрівання середовища або надлишок кисню можуть призвести до зниження кількості життєздатних клітин, тоді як недостатня аерація чи надмірне підкислення сповільнюють ріст і знижують якість отриманої біомаси.

Таблиця 2.1 - Основні параметри процесу вирощування дріжджів [16]

| Параметр | Оптимальне значення | Допустимі відхилення | Вплив на процес |
|--|---------------------|----------------------------|--|
| Температура середовища | 30-32 °C | ±1 °C | Визначає інтенсивність росту клітин та ферментативну активність |
| Реакція середовища (рН) | 4.5-5.0 | ±0.2 | Впливає на проникність клітинної мембрани і ферментативну активність |
| Рівень розчиненого кисню | 6-8 мг/л | 4–10 мг/л | Забезпечує дихання дріжджів і регулює швидкість розмноження |
| Тривалість росту | 6-8 годин | залежить від типу культури | Визначає концентрацію та вік клітин |
| Концентрація поживних речовин (цукрів) | 8-10% | ±1% | Забезпечує енергетичний потенціал клітин |

Продовження таблиці 2.1

| | | | |
|----------------|-------------|----------------|---|
| Тиск у системі | 0.1-0.2 МПа | ± 0.05 МПа | Впливає на ефективність аерації та тепломасообмін |
|----------------|-------------|----------------|---|

У процесі росту дріжджів виділяється значна кількість тепла, тому контроль температури є одним із ключових завдань автоматизації. Залежно від температури відбуваються зміни швидкості обміну речовин, активності ферментів і стійкості клітин до зовнішніх впливів. При перевищенні 35 °С дріжджі втрачають активність, клітинні білки денатурують, а культура деградує. При надмірному охолодженні (нижче 25 °С) процес росту істотно сповільнюється. Підтримання зазначених параметрів потребує чіткої координації між підсистемами подачі теплоносія, повітря та реагентів. Зокрема, система охолодження повинна мати зворотний зв'язок із датчиком температури середовища, а контур подачі повітря - адаптивне керування за концентрацією розчиненого кисню.

Процес вирощування дріжджів включає низку взаємопов'язаних біофізичних і хімічних явищ, які відбуваються послідовно:

- поглинання тепла культуральним середовищем при підтримці стабільної температури росту;
- розчинення кисню в рідині та його дифузія всередину клітин; споживання вуглеводів і перетворення їх у енергію для розмноження;
- виділення продуктів метаболізму (вуглекислого газу, тепла, спиртів);
- підтримка стабільного осмотичного тиску та кислотності середовища.

У процесі культивування частина вологи з поверхні культуральної рідини випаровується, що призводить до зміни концентрації речовин. Тому система автоматичного керування має компенсувати ці зміни шляхом дозованої подачі стерильної води або поживного середовища.

2.4 Аналіз процесу вибору температурних параметрів реактора

Температура є одним із ключових параметрів процесу ферментації, оскільки вона безпосередньо впливає на активність дріжджових клітин, швидкість біохімічних реакцій і кінцеву концентрацію етанолу. У дріжджових реакторах на лінії виробництва спирту підтримання оптимального температурного режиму забезпечує не лише високу продуктивність, але й стабільну якість кінцевого продукту.

З технологічної точки зору, температура в зоні зброджування визначає баланс між інтенсивністю ферментації та життєздатністю дріжджових клітин. При підвищенні температури понад оптимальні межі (вище 35–37 °C) спостерігається часткове руйнування клітинної структури, зниження активності ферментів та накопичення побічних метаболітів (вищих спиртів і альдегідів), що погіршує органолептичні властивості готового спирту. З іншого боку, зниження температури нижче 28 °C призводить до сповільнення реакцій бродіння і неповного зброджування цукрів.

Для типових штамів *Saccharomyces cerevisiae*, що застосовуються у виробництві етилового спирту з крохмалевмісної сировини (пшениця, кукурудза, ячмінь), оптимальна температура процесу становить 30–33 °C, із допустимими коливаннями не більше $\pm 0,5$ °C. [17] Підтримання цього діапазону здійснюється шляхом циркуляції теплоносія в сорочці реактора або подачею охолодженої води через теплообмінник.

Кіберфізична система контролю передбачає використання температурних сенсорів типу Pt100, розташованих у трьох контрольних точках: у верхній частині реактора (зона газоутворення), у середній (основна зона ферментації) та в нижній (зона осадження дріжджів). У процесі ферментації в реакторі відбувається самонагрів середовища внаслідок внутрішніх тепловиділяючих процесів, що призводить до зростання температури без зовнішнього підведення тепла. Сигнали з датчиків передаються на ПЛК, який за допомогою алгоритму PID-регулювання керує положенням електропневматичного клапана подачі охолоджувальної води для компенсації ефекту самонагріву та підтримання

заданого температурного режиму.

Залежність швидкості ферментації від температури можна апроксимувати експоненційною функцією:

$$V_f = V_{max} \cdot e^{-E_a / (R \cdot T)} \quad (2.1)$$

де V_f - швидкість ферментації (г етанолу/год·л),

V_{max} - максимальна швидкість при оптимальній температурі,

E_a - енергія активації реакції (кДж/моль),

R - універсальна газова стала,

T - абсолютна температура (К).

Аналіз цієї залежності показує, що навіть незначне відхилення температури (± 1 °С) може зменшити швидкість процесу на 6-8 %, а при тривалому відхиленні - призвести до 10–12 % втрат продуктивності.

Таблиця 2.2 - Вплив температури на швидкість ферментації та вихід етанолу

| Температура, °С | Швидкість ферментації, г/год·л | Вихід етанолу, % об. | Вміст побічних домішок, % |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 25 | 0,42 | 8,3 | 0,25 |
| 28 | 0,56 | 9,6 | 0,22 |
| 30 | 0,63 | 10,1 | 0,20 |
| 32 | 0,67 | 10,3 | 0,19 |
| 34 | 0,65 | 9,8 | 0,24 |
| 36 | 0,58 | 9,1 | 0,31 |

Як видно з таблиці, при температурі 32 °С спостерігається максимум ефективності процесу: швидкість ферментації сягає 0,67 г/год·л, а вміст побічних домішок мінімальний. Подальше підвищення температури викликає зниження продуктивності через тепловий стрес дріжджових клітин.

Система автоматизованого керування передбачає реалізацію двоконтурної

схеми регулювання:

Внутрішній контур – PID-регулювання температури середовища за сигналом термопари.

Зовнішній контур – ситуаційне коригування уставки температури залежно від фази ферментації (початкова, активна, стабілізаційна, відстійна).

Так, у початковій фазі підтримується температура 31 °С для прискорення адаптації дріжджів, в активній – 33 °С для досягнення максимальної продуктивності, а в завершальній – 29 °С для зниження утворення піни та збереження клітинної маси.

Таким чином, вибір температурних параметрів у дріжджових реакторах є критичним етапом проектування системи автоматичного керування. Використання кіберфізичного підходу дозволяє реалізувати адаптивну температурну стабілізацію, що підвищує вихід етилового спирту на 8–10 % та скорочує час зброджування на 12–15 % порівняно з традиційними схемами без динамічного коригування параметрів.

2.5 Аналіз процесу вибору тривалості циклу ферментації

Тривалість циклу ферментації є одним із ключових технологічних параметрів, що визначає ефективність роботи дріжджових реакторів та якість отриманого етилового спирту. Вона залежить від складу сировини, температурного режиму, активності дріжджової культури, концентрації поживних речовин та інтенсивності подачі повітря або кисню.

Зазвичай, для промислового спиртового виробництва на основі зернової або м'ясної сировини, повний цикл вирощування дріжджів триває від 6 до 10 годин, тоді як цикл основного бродіння суслу - від 48 до 72 годин. [18] Скорочення або подовження цих часових інтервалів без належного контролю призводить до значних технологічних відхилень. Надто короткий цикл не дозволяє дріжджовій культурі досягти необхідної біомаси та ферментативної активності, тоді як занадто довгий цикл викликає автоліз клітин і накопичення побічних продуктів[8].

Оптимальна тривалість ферментаційного циклу визначається за показниками концентрації цукрів, етилового спирту, біомаси дріжджів і кислотності середовища. Вона може бути розрахована за спрощеною емпіричною моделлю:

$$t_{opt} = (k \cdot (S_0 - S_k)) / (\mu_{max} \cdot X_0) \quad (2.2)$$

де t_{opt} - оптимальна тривалість циклу ферментації, год;

S_0, S_k - початкова та кінцева концентрації цукрів, г/л;

μ_{max} - максимальна питома швидкість росту дріжджів, год⁻¹;

X_0 - початкова концентрація біомаси дріжджів, г/л;

k - коефіцієнт корекції (враховує температуру, рН і ефективність аерації).

Для типових умов ферментації при температурі 32 °С, початковій концентрації цукрів 160 г/л, кінцевій - 20 г/л, швидкості росту дріжджів $\mu_{max} = 0.42$ год⁻¹ і початковій біомасі $X_0 = 5.5$ г/л, отримаємо:

$$t_{opt} = (1.05 \cdot (160 - 20)) / (0.42 \cdot 5.5) \approx 67.7 \text{ год.}$$

Отже, оптимальний цикл ферментації становить близько 68 годин, що відповідає практичним даним для зернової сировини.

Таблиця 2.3 - Вплив тривалості ферментації на вихід та якість етилового спирту

| Тривалість циклу, год | Вихід спирту, % об. | Вміст залишкових цукрів, г/л | Вміст побічних домішок, % | Оцінка якості продукту |
|-----------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|
| 48 | 8,9 | 25 | 0,30 | Задовільна |
| 60 | 9,8 | 15 | 0,24 | Хороша |
| 68 | 10,3 | 8 | 0,20 | Оптимальна |
| 72 | 10,4 | 7 | 0,22 | Оптимальна |
| 80 | 10,1 | 6 | 0,30 | Незадовільна |

Як видно з таблиці, максимальний вихід спирту спостерігається в межах 68-72 годин, після чого відбувається зростання кількості побічних домішок та

зниження якості готового продукту.

У системі автоматизованого керування дріжджовим відділенням тривалість ферментаційного циклу визначається динамічно - за допомогою комплексного контролю параметрів середовища: поточного вмісту цукрів (за сигналами датчика оптичної щільності або рефрактометра), рівня етанолу (газоаналізатор CO₂ або датчик щільності), температури та рН.

Кіберфізична система аналізує зміни цих параметрів у реальному часі та виконує прогнозування моменту завершення ферментації на основі аналітичної моделі. При досягненні стабілізації параметрів (зменшення швидкості утворення CO₂, стабільність рН, низький рівень залишкових цукрів) система формує сигнал про завершення циклу та автоматично переводить реактор у режим відстою.

Для підвищення точності визначення моменту завершення процесу використовується алгоритм адаптивного прогнозування на основі ковзного середнього, який аналізує зміну швидкості ферментації за попередні 3-5 годин:

$$V_{avg}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{i-1} - S_i), \quad (2.3)$$

де S_i - концентрація цукрів у момент часу t_i . Якщо $V_{avg}(t)$ менше порогового значення 0.5 0.5 г/л·год, процес автоматично вважається завершеним.

Таким чином, автоматизований вибір тривалості ферментації дозволяє уникнути як передчасного завершення процесу, так і перетримки бродильної маси. Впровадження кіберфізичної системи з адаптивним прогнозуванням скорочує середній час ферментації на 6-8 годин, підвищує вихід спирту на 3-5 %, а також забезпечує стабільність якості біопродукту на всіх етапах технологічного циклу.

2.6 Синтез моделі управління дріжджовими реакторами

2.6.1 Вимоги методу до розв'язання задачі

Розв'язання поставленого завдання вимагає врахування таких основних вимог до обраного методу:

- формалізація технологічного процесу у вигляді дискретної моделі. Метод повинен забезпечувати можливість подання процесу культивування дріжджів у вигляді скінченного автомата станів з чітко визначеними етапами, умовами переходів та керуючими діями, що відповідають реальній технологічній послідовності.

- однозначність логіки прийняття рішень. Логіка керування має ґрунтуватися на детермінованих правилах типу «якщо–то», сформованих на основі сигналів датчиків, таймерів та команд оператора, що виключає неоднозначне трактування станів процесу.

- можливість реалізації в програмованих логічних контролерах. Обраний метод повинен бути придатним для практичної реалізації в середовищі TIA Portal із використанням мов програмування стандарту IEC 61131-3, зокрема SCL, без необхідності застосування складних обчислювальних процедур.

- модульність та розширюваність алгоритму керування. Структура алгоритму має дозволяти зміну параметрів, додавання нових станів або умов переходів без порушення загальної логіки роботи системи, що забезпечує адаптацію до змін технологічного процесу.

2.6.2 Граф станів

Для реалізації автономного керування процесом культивування дріжджів у програмному середовищі TIA Portal розроблено алгоритм у вигляді автомата зі скінченною кількістю станів. Граф станів алгоритму наведено на рисунку 2.1 та відображає послідовність етапів технологічного процесу і логічні умови переходів між ними.

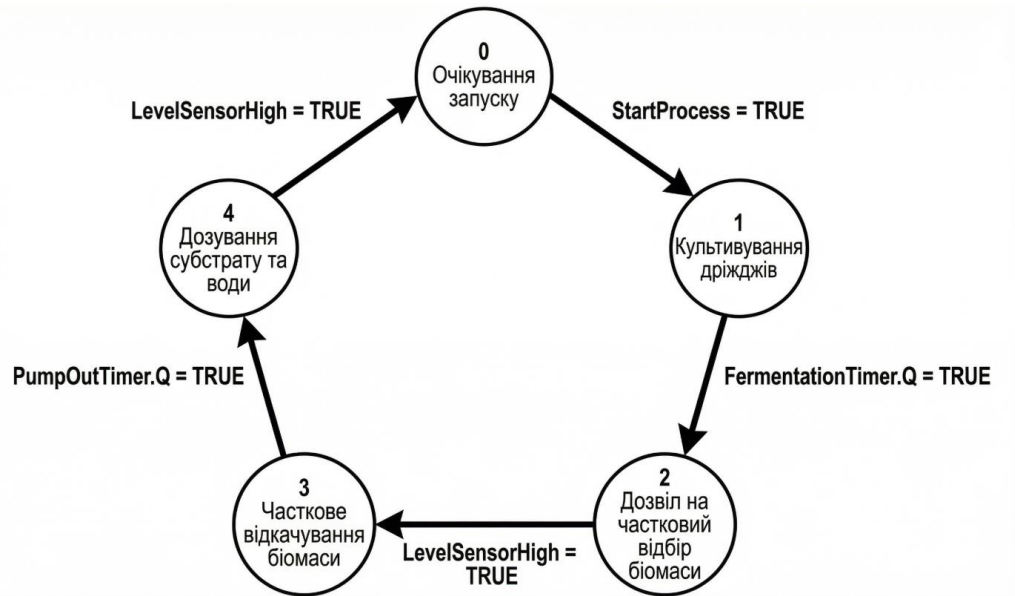


Рисунок 2.1 – Граф станів

Стан 0 - «Очікування запуску». У початковому стані система перебуває в режимі очікування. Всі виконавчі механізми вимкнені, процес культивування неактивний. Перехід до наступного стану здійснюється при надходженні сигналу $StartProcess = TRUE$, що ініціює початок технологічного циклу.

Стан 1 - «Культивування дріжджів». У цьому стані відбувається основний процес ферментації. Активується таймер культивування, який відліковує задану тривалість росту дріжджової біомаси. Протягом цього етапу відбір біомаси та дозування не виконуються. Перехід до стану дозволу на відбір здійснюється після спрацювання таймера культивування $FermentationTimer.Q = TRUE$.

Стан 2 - «Дозвіл на частковий відбір біомаси». Даний стан є підготовчим і забезпечує логічне підтвердження можливості часткового відбору дріжджової біомаси. Перехід до стану відкачування виконується за умови досягнення верхнього рівня у реакторі, що фіксується сигналом $LevelSensorHigh = TRUE$.

Стан 3 – «Часткове відкачування біомаси». У цьому стані активується насос відкачування, який забезпечує видалення обмеженого об'єму дріжджової біомаси з реактора. Тривалість роботи насоса визначається таймером відкачування. Після завершення відліку часу $PumpOutTimer.Q = TRUE$ система переходить до наступного стану.

Стан 4 – «Дозування субстрату та води». На даному етапі здійснюється

автоматичне дозування субстрату та води з метою компенсації відібраного об'єму біомаси та забезпечення безперервності процесу. Після досягнення заданого рівня у реакторі $LevelSensorHigh = TRUE$ алгоритм повертається до початкового стану очікування запуску, що завершує цикл керування.

2.6.3 Математична модель

Алгоритм керування процесом культивування дріжджів описується у вигляді дискретної подієво-часової моделі, представленої скінченним автоматом станів.

Модель визначається кортежем:

$$M = \langle S, X, \delta \rangle \quad (2.4)$$

де $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4\}$ — множина станів технологічного процесу;

X — множина вхідних подій та умов (сигнали датчиків і таймерів);

δ — функція переходів між станами.

Перехід між станами здійснюється на основі продукційних правил типу «якщо–то»:

$$(S = S_i) \wedge C_{ij} \Rightarrow S := S_j, \quad (2.5)$$

де C_{ij} — логічна умова, що формується сигналами керування, датчиків рівня та виходами таймерів. Для розглянутого процесу система продукцій має вигляд:

$$\begin{aligned} (S = S_0) \wedge StartProcess &\Rightarrow S := S_1, \\ (S = S_1) \wedge FermentationTimer.Q &\Rightarrow S := S_2, \\ (S = S_2) \wedge LevelSensorHigh &\Rightarrow S := S_3, \\ (S = S_3) \wedge PumpOutTimer.Q &\Rightarrow S := S_4, \\ (S = S_4) \wedge LevelSensorHigh &\Rightarrow S := S_0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

3 СИНТЕЗ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів

Функціональна схема кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів є ключовим елементом структурного проєктування системи автоматизації та визначає взаємодію між засобами вимірювальної техніки, виконавчими механізмами, контролером, операторським інтерфейсом і засобами узгодження з верхнім рівнем керування. [19] У контексті виробництва етилового спирту дріжджові реактори відіграють критичну роль, оскільки саме на цій стадії формується необхідна біомаса дріжджів, що забезпечує високу інтенсивність спиртового бродіння. Тому функціональна схема повинна не лише відобразити потоки інформації та керуючих впливів, а й відповідати вимогам стабільності, безперервності та надійності, характерним для біотехнологічних процесів.

На ділянці дріжджових реакторів передбачено встановлення комплексу сенсорів, які забезпечують безперервний контроль ключових технологічних параметрів. До їх складу належать датчики температури, рівня робочої суспензії, кислотності середовища, а також сенсори розчиненого кисню або аерації. Ці вимірювальні перетворювачі встановлюються безпосередньо на корпусах ферментерів або на технологічних трубопроводах, забезпечуючи отримання первинної інформації щодо стану середовища у реакторі. Сигнали від датчиків, відповідно до їх фізичної природи, надходять на аналогові входи контролера через проміжні модулі вводу, де вони перетворюються в цифрові дані, доступні для подальшої обробки. Враховуючи особливості біотехнологічного процесу, дана інформація потребує фільтрації, нормалізації та контролю на коректність, що реалізується програмними засобами PLC.

Управляючі впливи в системі формуються на основі аналізу фактичних значень параметрів та їх відхилення від установлених рецептурних чи контрольних значень. Програмований логічний контролер виконує обчислення за алгоритмами регулювання, зокрема PID- або каскадного типу, що дозволяє підтримувати стабільний температурний режим, рівень робочої маси,

оптимальний ступінь аерації та необхідний кислотно-лужний баланс. На основі результатів обчислень PLC формує вихідні сигнали для керування виконавчими механізмами, такими як електропривідні та пневматичні клапани подачі пари, охолоджувальної води, повітря, субстрату та суспензії. Завдяки цьому система забезпечує необхідні умови для росту дріжджових клітин, уникнення перегріву, коливань рН та недостачі кисню, що є критичними факторами технологічного процесу.

Панель оператора НМІ виконує роль локального інтерфейсу взаємодії людини з кіберфізичною системою. На ній у режимі реального часу відображаються значення основних параметрів, стани виконавчих механізмів, активні аварії та попередження, а також графіки та діагностична інформація. Оператор може переходити до ручного керування окремими клапанами, змінювати рецептури або встановлювати нові технологічні параметри, а також отримувати рекомендації від системи у рамках реалізації підсистеми підтримки прийняття рішень.

Для забезпечення обміну даними між контролером, НМІ та системами верхнього рівня застосовуються спеціалізовані пристрої узгодження, що забезпечують комунікацію за допомогою промислових протоколів Ethernet або Modbus TCP. Наявність таких пристроїв дозволяє інтегрувати КФС дріжджових реакторів у загальну інформаційно-керуючу структуру спиртового виробництва, забезпечуючи передачу оперативних параметрів, журналів подій та даних для аналітичних модулів або SCADA-системи.

У системі керування дріжджовими реакторами важливу роль відіграють виконавчі клапани, які забезпечують реалізацію технологічних операцій та стабілізацію параметрів процесу. На подачі пари встановлюються регулюючі клапани, які керуються сигналами від PLC та забезпечують нагрівання реактора до необхідної температури. Їх конструкція зазвичай базується на пневматичному виконавчому механізмі, що дозволяє плавно змінювати ступінь відкриття клапана відповідно до вихідного сигналу регулятора температури. Подача охолоджувальної води здійснюється через аналогічні регулюючі клапани, які

забезпечують відведення надлишкового тепла та підтримують стабільність температурного режиму під час активного росту дріжджової культури.

На лініях подачі субстрату і повітря застосовуються як регулюючі, так і швидкодіючі дискретні клапани, що дозволяють дозувати кількість поживних речовин і забезпечувати необхідний рівень аерації. Клапани подачі повітря взаємодіють із системою аерації, а їхнє точне налаштування є критично важливим для підтримання концентрації розчиненого кисню у межах оптимального діапазону, що контролюється відповідними сенсорами аерації.

На виході реактора, де здійснюється відбір суспензії для подальших технологічних стадій, встановлюються запірні клапани, які за командою контролера у визначені моменти відкриваються для виведення необхідної кількості біомаси. Усі перелічені клапани зв'язуються з контролером через дискретні або аналогові виходи, а їхній стан постійно контролюється системою для запобігання аварійних ситуацій, таких як неконтрольований витік середовища, перегрів чи недостатня подача кисню.

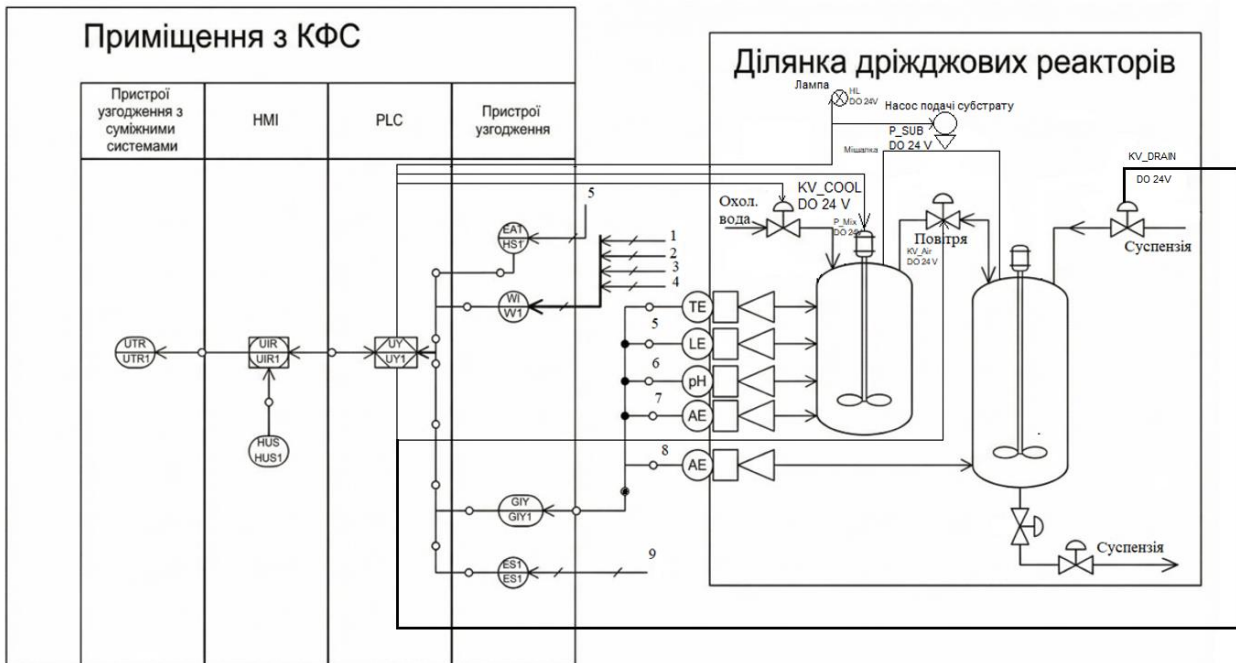


Рисунок 3.1 - Функціональна схема автоматизації кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів на лінії з виготовлення спирту

У результаті, функціональна схема автоматизації виглядатиме, як показано на рисунку 3.1.

3.2 Розробка принципової схеми комплексу технічних засобів

3.2.1 Аналіз входів та виходів системи

У процесі обґрунтування комплексу технічних засобів кіберфізичної системи керування виконано детальний аналіз інформаційних сигналів, що надходять на програмований логічний контролер, а також керуючих виходів, які формуються для впливу на технологічне обладнання ділянки дріжджових реакторів. Відповідно до функціональної схеми системи (рисунок 3.1), КФС оперує сукупністю аналогових та дискретних сигналів, що забезпечують моніторинг основних параметрів технологічного процесу та реалізацію керуючих дій на виконавчі механізми.

Технологічний процес культивування дріжджів є чутливим до зміни температури, рівня робочої суспензії, кислотності середовища, концентрації розчиненого кисню та тиску в апараті. У зв'язку з цим система оснащена комплексом первинних вимірювальних перетворювачів, які формують аналогові сигнали для подальшої обробки контролером. До складу аналогових вимірювальних входів входять датчики температури середовища, рівня суспензії, кислотності, розчиненого кисню, тиску в реакторі та витрати повітря. Усі зазначені датчики формують уніфіковані аналогові сигнали (Pt100 або 4–20 мА), які надходять на відповідні входи PLC, де виконуються їх масштабування, фільтрація та використання в алгоритмах керування і контролю.

Керуючі виходи кіберфізичної системи реалізовані у вигляді дискретних сигналів керування виконавчими механізмами технологічного обладнання. Згідно зі схемою, до таких належать: насос подачі субстрату, насос змішування, електромагнітний клапан подачі повітря (аерації), клапан подачі охолоджувальної води в сорочку реактора, а також клапан дренажу дріжджової суспензії. Крім того, у системі передбачено дискретний вихід на сигнальну

лампу аварійної індикації, яка використовується для візуального сповіщення персоналу про нештатні режими роботи.

Ділянка містить два технологічно ідентичні дріжджові реактори, кожен з яких оснащений однаковим комплектом датчиків і виконавчих механізмів. У зв'язку з цим кількість аналогових вимірювальних входів і дискретних керуючих виходів контролера подвоюється, тоді як загальносистемні елементи, зокрема панель оператора НМІ та сигнальна лампа аварійної сигналізації, є спільними для всієї ділянки та не потребують дублювання.

Взаємодія кіберфізичної системи з оператором та суміжними рівнями автоматизації здійснюється через панель PLC та програмований логічний контролер, об'єднані промисловою мережею. Це забезпечує відображення поточних технологічних параметрів, станів виконавчих механізмів, а також формування повідомлень про аварійні та попереджувальні ситуації.

На основі аналізу функціональної схеми та складу технологічного обладнання сформовано зведену таблицю входів і виходів кіберфізичної системи керування ділянкою дріжджових реакторів, яка наведена у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Перелік вхідних та вихідних сигналів

| № п/п | Найменування сигналу | Ідентифікатор (PLC-тег) | Напр. вх./вих | Функція | Вид | Джерело/Отримувач | Форма представлення | | Період сек. |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|-------------|------------|--------------------------------|---------------------|--------|-------------|
| | | | | | | | Зовн. | Внут. | |
| 1. Вимірювальні сигнали | | | | | | | | | |
| 1 | Температура середовища ТЕ | %IW96 | Вхід | Вимірювання | Аналоговий | Датчик Pt100 RTD | Pt100, 3-пров. | 16 біт | 1.0 |
| 2 | Рівень суспензії LE | %IW98 | Вхід | Вимірювання | Аналоговий | Радарний датчик датчик 4-20 mA | 4-20 mA | 16 біт | 1.0 |

Продовження таблиці 3.1

| | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|--------------|-------|-------------|------------|-------------------------------|---------|--------|-----|
| 3 | Кислотність (рН) | %IW100 | Вхід | Вимірювання | Аналоговий | рН-електрод з трансмітером | 4-20 mA | 16 біт | 1.0 |
| 4 | Розчинений кисень DO1 | %IW102 | Вхід | Вимірювання | Аналоговий | DO-сенсор (O ₂) | 4-20 mA | 16 біт | 1.0 |
| 5 | Тиск у реакторі | AI4 (%IW112) | Вхід | Вимірювання | Аналоговий | Датчик тиску | 4-20 mA | 16 біт | 1.0 |
| 6 | Витрата повітря | AI5 (%IW114) | Вхід | Вимірювання | Аналоговий | Витратомір повітря | 4-20 mA | 16 біт | 1.0 |
| 2. Керуючі та виконавчі сигнали | | | | | | | | | |
| 8 | Насос подачі субстрату | %Q0.3 | Вихід | Керування | Дискретний | Насос 1 | 24V | 1біт | 0.5 |
| 9 | Клапан охолодження сорочки | %Q0.1 | Вихід | Керування | Дискретний | Соленоїд охолоджувальної води | 24V | 1біт | 0.5 |
| 10 | Клапан аерації (відкриття повітря) | %Q0.2 | Вихід | Керування | Дискретний | Електромагнітний клапан | 24V | 1біт | 0.5 |
| 11 | Дозатор дренажу суспензії | %Q0.4 | Вихід | Керування | Дискретний | Електромагнітний клапан | 24V | 1біт | 0.5 |
| 12 | Насос змішування | %Q0.6 | Вихід | Керування | Дискретний | Насос 2 | 24V | 1біт | 0.5 |
| 14 | Сигнал аварії | %Q1.1 | Вихід | Контроль | Дискретний | Сигнальна лампа | 24V | 1біт | 0.5 |

Таблиця 3.1 визначає повний склад вимірювальних, дискретних керуючих та аварійних сигналів, що забезпечують контроль ключових параметрів біотехнологічного процесу - температури, рівня суспензії, кислотності

середовища, концентрації розчиненого кисню, тиску. Усі параметри подані у стандартизованих діапазонах що гарантує сумісність із контролером SIMATIC S7-1200 та відповідає вимогам промислової автоматизації.

Таблиця 3.2 - Зведена таблиця реальних входів та виходів КФС

| № п/п | Обладнання / підсистема | Опис входів/виходів | Кількість |
|---|---------------------------------------|-------------------------|-----------|
| Аналогові вимірювальні входи до 2 реакторів | | | |
| 1 | Датчик температури середовища (TE) | Аналоговий вхід Pt100 | 2 |
| 2 | Датчик рівня суспензії (LE) | Аналоговий вхід 4-20 mA | 2 |
| 3 | Датчик кислотності рН | Аналоговий вхід 4-20 mA | 2 |
| 4 | Датчик розчиненого кисню DO1 | Аналоговий вхід 4-20 mA | 2 |
| 5 | Датчик тиску у реакторі (PE) | Аналоговий вхід 4-20 mA | 2 |
| 6 | Датчик витрати повітря | Аналоговий вхід 4-20 mA | 2 |
| Разом аналогових входів до 2 реакторів: | | | 12 |
| Дискретні керуючі виходи | | | |
| 7 | Клапан охолоджувальної води (KV_COOL) | Дискретний вихід 24 V | 2 |
| 8 | Насос подачі субстрату (P_SUB) | Дискретний вихід 24 V | 2 |
| 9 | Насос змішування (P_Mix) | Дискретний вихід 24 V | 2 |
| 10 | Клапан подачі повітря (KV_AIR) | Дискретний вихід 24 V | 2 |

Продовження таблиці 3.2

| | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|----|
| 11 | Дозатор дренажу суспензії (KV_DRAIN) | Дискретний вихід 24 V | 2 |
| 12 | Сигнальна лампа | Дискретний вихід 24 V | 1 |
| Разом виходів до 2 реакторів: | | | 11 |
| Комунікаційні канали | | | |
| 13 | Панель оператора НМІ | Дані через Profinet/Ethernet | 1 |
| 14 | Панель PLC | Дані через Profinet/Ethernet | 1 |
| Разом комунікацій: | | | 2 |

Зведена таблиця 3.2 узагальнює усі входи та виходи системи за типами сигналів, що дозволяє однозначно визначити необхідний склад.

3.2.2 Обґрунтування елементної бази системи

На основі проведеного аналізу вхідних та вихідних сигналів, а також з урахуванням функціональної структури кіберфізичної системи, оберемо оптимальний комплекс технічних засобів, що забезпечуватимуть стабільну роботу системи, надійну обробку вимірювальної інформації, формування керуючих впливів і взаємодію з верхнім рівнем автоматизації. При виборі елементної бази враховуються вимоги до точності вимірювань, швидкодії контурів регулювання, хімічної стійкості сенсорів, сумісності обладнання між собою, а також вимоги Замовника щодо ергономіки операторського інтерфейсу.

З урахуванням вимог щодо зручності та ергономічності інтерфейсу оператора дріжджових реакторів, вибір і обґрунтування комплексу технічних засобів доцільно розпочати саме з панелі НМІ. [21]

Для реалізації цих функцій обирається панель КТР1200 Basic PN, яка

повністю відповідає вимогам Замовника щодо розміру екрана, функціональності та підтримки сучасних промислових мереж. Основні технічні характеристики панелі:

- діагональ 12,1 “;
- роздільна здатність 1280x800 пікселів;
- кольорів 64К;
- матриця керування TFT;
- механічних функціональних клавіш 10;
- Profinet 1 порт;
- USB 1 порт;
- напруга живлення 24 В постійного струму;
- споживаний струм 550 мА.



Рисунок 3.2 - HMI-панель KTP1200 Basic PN

Центральним обчислювальним елементом системи доцільно обрати контролер Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C, який має достатній резерв продуктивності для реалізації регуляторів температури, рівня, аерації та рН, а також містить необхідні комунікаційні інтерфейси для взаємодії з HMI та SCADA/MES-системами. [22] Обраний контролер підтримує роботу з аналоговими та дискретними сигналами та має можливість розширення за допомогою стандартних модулів вводу-виводу, що є критичним у зв'язку з потребою приймання п'яти аналогових сигналів від датчиків TE, LE, рН та АЕ1-АЕ2. Її значимі характеристики:

- дискретні входи - 14 шт., 24 В DC;
- дискретні виходи - 10 шт., реле 2 А;

- аналогові входи - 2 шт. (0-10 В);
- пам'ять програм - 100 КБ;
- інтерфейс Profinet - 1 порт;
- напруга живлення - 24 В DC;
- споживаний струм - 800 мА;
- підтримка модулів розширення - до 8 шт.



Рисунок 3.3 - Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C

Оскільки базової кількості аналогових входів CPU недостатньо, для приймання всієї вимірювальної інформації обирається окремий модуль аналогового вводу Siemens SM 1231 AI (4×AI, 4 - 20 мА / 0 - 10 В) і SM1231 RTD. [23] Цей модуль забезпечує необхідну розрядність сигналів (16 біт), що дозволяє досягти високої точності при контролі температури, кислотності та концентрації розчиненого кисню - параметрів, критичних для біотехнологічного процесу, модуль зображений на рисунку 3.4. Основна характеристика:

- кількість аналогових входів - 4 шт.;
- вхідні діапазони - 4-20 мА, 0-10 В;
- розрядність перетворення - 16 біт;
- абсолютна похибка - $\leq 0,1\%$;
- напруга живлення - 24 В DC;
- споживання від шини - до 50 мА;
- час перетворення - 50 мс на канал.



Рисунок 3.4 - Siemens SM 1231 AI

Контроль основних параметрів процесу ферментації здійснюється за допомогою групи вимірювальних перетворювачів аналогового типу.

Для вимірювання температури середовища у кожному реакторі використовується термометр опору Endress+Hauser iTHERM TM411, який забезпечує високу точність та стабільність вимірювань у широкому діапазоні температур. [8] Датчик формує сигнал типу Pt100, який надходить на аналоговий вхід PLC через відповідний модуль обробки.

Контроль рівня суспензії в апаратах реалізовано за допомогою радарного датчика Siemens SITRANS LR250, що забезпечує безперервне вимірювання рівня незалежно від щільності та властивостей середовища.[9] Вихідний сигнал датчика — стандартний аналоговий струмовий сигнал 4–20 мА.

Для контролю кислотності середовища застосовується промисловий рН-датчик Endress+Hauser CPS11D, обладнаний трансмітером з вихідним сигналом 4–20 мА, що дозволяє інтегрувати його безпосередньо до аналогових входів контролера. [13]

Вимірювання тиску всередині реакторів здійснюється за допомогою датчика Rosemount 3051S, який забезпечує високу точність та надійність при роботі в умовах підвищеної вологості та температури. Сигнал передається у PLC у вигляді аналогового струмового сигналу. [10]

Додатково для контролю процесу аерації використовується датчик концентрації розчиненого кисню (DO-сенсор), що формує аналоговий сигнал 4–

20 мА та забезпечує оцінку ефективності подачі повітря в реактор.

Подача субстрату до реакторів реалізується за допомогою дозувального насоса Grundfos DDA 12-10, зображеного на рисунку 3.5, який забезпечує стабільне та кероване введення поживного середовища. [11] У системі насос керується дискретним сигналом увімкнення/вимкнення.



Рисунок 3.5 - насос Grundfos DDA 12-10

Електромагнітні клапани використовуються для керування потоками технологічних середовищ у кожному дріжджовому реакторі, а саме: подача охолоджувальної води в сорочку реактора (KV_COOL), подача повітря для аерації культурального середовища (KV_AIR), дренаж дріжджової суспензії (KV_DRAIN).

Як виконавчі пристрої обрано електромагнітні клапани загальнопромислового типу Bürkert 6213 (рисунок 3.6), що має такі основні характеристики:

- тип керування - дискретний (ON/OFF);
- напруга живлення котушки - 24 В DC;



Рисунок 3.6 - Bürkert 6213 [25]

Розрахунок споживаної потужності виконано на основі кількості каналів вводу-виводу PLC відповідно до функціональної схеми системи. Для двох дріжджових реакторів використовується 12 аналогових входів, три модулі SM 1231 AI та дискретні виходи для керування виконавчими механізмами.

Таблиця 3.3 - Розрахунок споживаної потужності вхідних та вихідних каналів PLC

| Тип споживача | Споживаний струм, мА | Споживана потужність, Вт | Кількість входів/виходів, шт | Сумарна потужність, Вт |
|-------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|
| Цифровий вхід | 1 | 0,024 | 1 | 0,024 |
| Цифровий вихід | 4 | 0,096 | 12 | 1,152 |
| Аналоговий вхід | 10 | 0,24 | 12 | 2,880 |
| Модуль розширення | 80 | 1,92 | 3 | 5,760 |
| Всього: | | | | 9,792 Вт |

У КТР1200 Basic PN напруга живлення становить 24В, а споживаний струм дорівнює приблизно 550, з цього ми можемо підрахувати потужність НМІ:

$$24 \times 0,55 = 13,2 \text{ Вт}$$

Порахуємо канали PLC, модулі та НМІ панель:

$$9,792 + 13,2 = 23 \text{ Вт}$$

Джерело живлення РМ1207:

$$24 \text{ В} \times 2,5 \text{ А} = 60 \text{ Вт}$$

Що означає, джерело живлення однак залишається в межах допустимих значень та не перевищує номінальні характеристики обраного джерела живлення.

3.2.3 Реалізація принципової схеми кіберфізичної системи

На основі обораної елементної бази, опису входів та виходів системи, реалізовано кіберфізичну систему, представлену на рисунку 3.8:

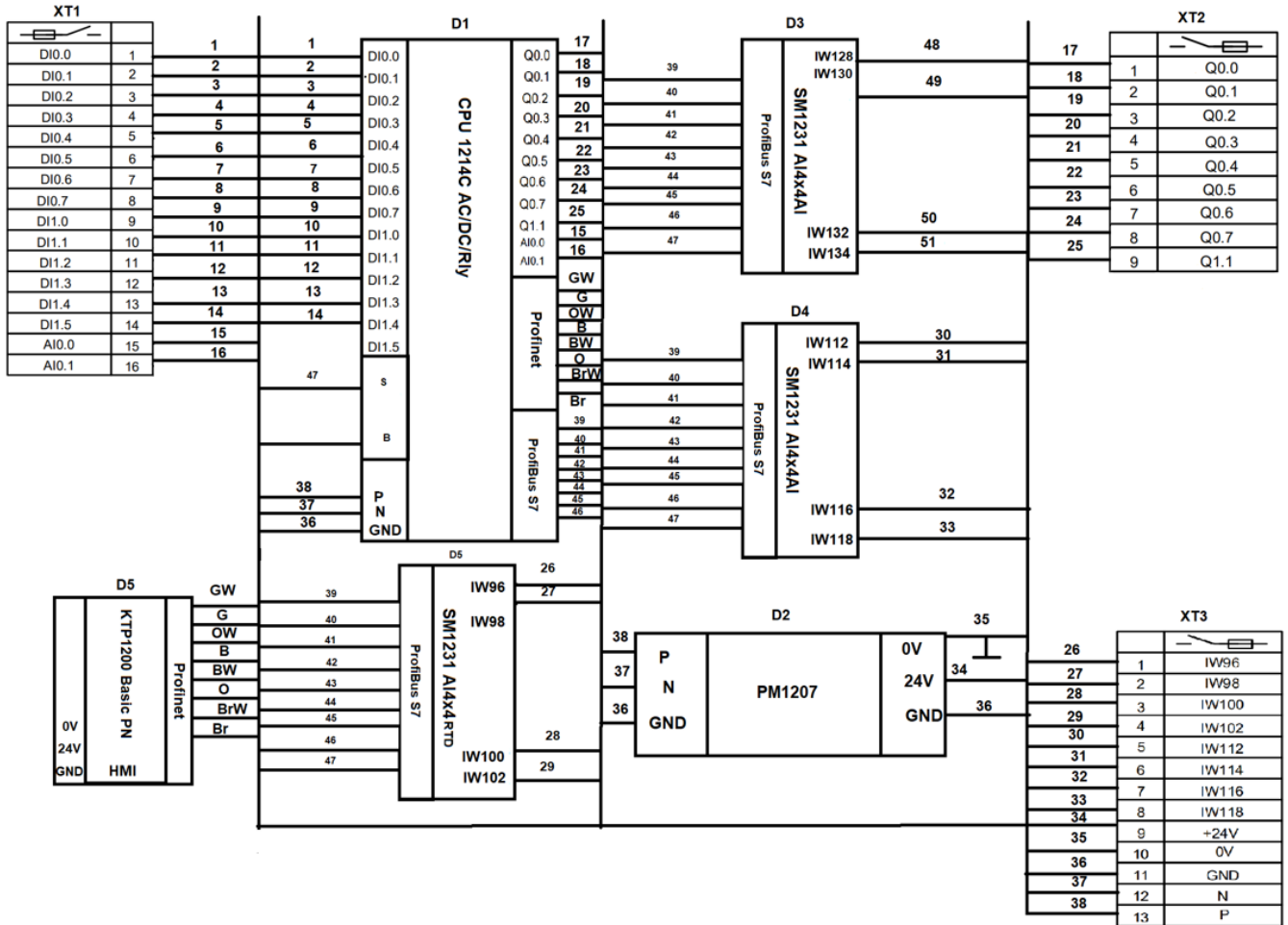


Рисунок 3.8 - Принципова схема

4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Призначення та область застосування програмного забезпечення

Розроблене програмне забезпечення призначене для автоматизації основних технологічних операцій дріжджового реактора у складі кіберфізичної системи. Програма здійснює збір, масштабування та обробку аналогових сигналів від датчиків температури, рівня, кислотності, тиску та розчиненого кисню, а також формує керуючі дії на виконавчі механізми реакторної установки. Алгоритми забезпечують стабільність технологічного процесу, підтримання необхідних параметрів середовища та своєчасне реагування на відхилення, що дозволяє підвищити якість ферментації та зменшити ризик аварійних ситуацій.

ПЗ використовується на контролері Siemens SIMATIC S7-1200 та може бути інтегроване у локальну або верхньорівневу систему керування через інтерфейс Profinet. В складі програмного забезпечення реалізовано автономний алгоритм керування мовою SCL, який забезпечує циклічне виконання етапів культивування дріжджів, контроль часу ферментації, частковий відбір біомаси та автоматичне дозування субстрату і води без участі оператора та без використання НМІ.

4.2 Логічна структура керування

Програма користувача розміщена в сегменті оперативної пам'яті програм користувача програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200 та реалізована в середовищі TIA Portal. Програма складається з організаційних блоків циклічного виконання, таблиць тегів пам'яті, а також функціональних блоків FB_YeastBatchControl та FB_Scale.

Основним блоком керування технологічним процесом є функціональний блок FB_YeastBatchControl, який реалізує алгоритм автоматизованого керування періодичним процесом ферментації дріжджів. У даному блоці реалізовано логіку покрокового виконання технологічних операцій із використанням внутрішнього автомата станів та таймерів затримки.

У функціональному блоці FB_YeastBatchControl реалізовані такі логічні етапи та дії:

- запуск процесу ферментації за командою оператора;
- ініціалізація та скидання алгоритму керування;
- контроль сигналу верхнього рівня в реакторі;
- формування керуючих впливів на подачу води та субстрату;
- облік заданого часу ферментації з використанням таймера типу TON;
- формування ознаки завершення ферментаційного процесу;
- керування процесом відкачування дріжджової маси з реактора;
- облік часу роботи насоса відкачування;

Для реалізації часових затримок та відліку тривалості технологічних етапів у блоці FB_YeastBatchControl використано стандартні таймери TON_TIME, зокрема таймер ферментації, таймер відкачування.

Функціональний блок FB_Scale призначений для лінійного масштабування аналогових сигналів, отриманих від датчиків технологічних параметрів. Блок виконує перетворення сирого значення аналого-цифрового перетворювача у фізичні одиниці вимірювання відповідно до заданих меж масштабування. Результат масштабування використовується в алгоритмах контролю та відображається оператору.

Логіка програми побудована за модульним принципом, що забезпечує зручність налагодження, повторного використання та розширення програмного забезпечення. Обмін даними між блоками здійснюється через формалізовані вхідні та вихідні параметри.

Програму реалізовано мовою SCL (Structured Control Language), що дозволяє чітко описати алгоритмічну логіку, забезпечити структурованість коду та відповідність сучасним вимогам до розроблення програмного забезпечення для кіберфізичних систем керування технологічними процесами..

4.3 Обґрунтування технічних характеристик програмного забезпечення

Програмне забезпечення системи керування ділянкою дріжджових реакторів, що реалізоване на базі програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200, призначене для автоматизованого керування періодичним процесом ферментації та повинно забезпечувати виконання таких функцій:

- прийом дискретних сигналів від давачів рівня середовища в реакторах відповідно до схеми функціональної автоматизації та принципової схеми КТЗ;
- прийом керуючих команд на запуск і скидання процесу;
- обробку аналогових сигналів технологічних параметрів із виконанням їх масштабування у фізичні одиниці вимірювання;
- формування керуючих впливів на виконавчі механізми подачі води, субстрату та відкачування дріжджової маси;
- облік заданої тривалості ферментації та часу відкачування з використанням програмних таймерів;
- формування ознак завершення технологічного процесу та поточного стану алгоритму керування.

Алгоритми керування реалізовані з використанням мови програмування SCL (Structured Control Language), що забезпечує структурованість програмного коду та виключає можливість неконтрольованих зациклювань у межах технологічної програми. Обробка дискретних вхідних сигналів здійснюється із застосуванням апаратної фільтрації модулів введення контролера, що забезпечує захист від брязкоту контактів та підвищує достовірність зчитування сигналів. Читання вхідних сигналів і формування керуючих впливів на виходи виконується в межах стандартного циклу сканування програми контролера, що унеможливорює помилкові спрацювання виконавчих механізмів під час обчислень. Ініціалізація програмного забезпечення здійснюється автоматично при подачі живлення на контролер. Початкові параметри та значення змінних задаються на етапі конфігурування та зберігаються в пам'яті контролера.

З урахуванням обмеженої кількості програмних блоків та відносно

невеликої складності алгоритмів можна стверджувати, що час одного циклу сканування програми не перевищує 10–15 мс, що є достатнім для керування періодичним біотехнологічним процесом.

Програма використовує такі вхідні дані: сигнали від датчиків рівня, керуючі команди на запуск і скидання процесу, а також параметри часу ферментації та відкачування. Вихідними даними є керуючі сигнали на виконавчі механізми, ознака завершення процесу та код поточного стану алгоритму.

Технічні та програмні засоби розроблення програмного забезпечення відповідають рекомендаціям виробника контролерів SIMATIC S7-1200. Мова програмування - SCL для PLC SIMATIC, середовище розробки - Siemens TIA Portal V16.[24]

4.4 Опис розробленої програми

4.4.1 Загальні відомості

Текст програми розміщено у проекті KurychenkoMag у середовищі TIA Portal V.16. Усі модулі, мережі та блоки, що формують логіку керування біореактором, зібрані в основному організаційному блоці OB1 та підлеглих функціональних блоках.

Для завантаження програми в контролер використовується апаратна платформа Siemens S7-1200. Після запису в контролер виконуваний код зберігається у внутрішній пам'яті і при наступних увімкненнях повторно завантаження не потребує. Програма виконується циклічно за допомогою вбудованого інтерпретатора, що забезпечує опитування входів, обробку алгоритмів та формування вихідних сигналів у реальному часі.

Мова реалізації програми – FBD, SCL. Мовою FBD реалізовано обробку аналогових сигналів та порогові алгоритми керування, тоді як мовою SCL розроблено автономний алгоритм керування партійним процесом культивування дріжджів на основі кінцевого автомата станів.

4.4.2 Функціональне призначення

Програма забезпечує автоматизоване керування основними технологічними контурами біореактора у штатних режимах роботи. Усі обчислення та логічні умови виконуються в контролері, а результати відображаються за допомогою симуляції PLCSim.

До функцій програмного забезпечення входить:

- перетворення аналогових сигналів від датчиків температури, рівня суспензії, рН, розчиненого кисню, тиску та витрати повітря з формату 4-20 мА, RTD у фізичні величини;
- реалізація порогових алгоритмів;
- автоматичне керування виконавчими механізмами
- формування сигналів аварійного відключення при виході параметрів за безпечні межі;
- реалізація логіки послідовного виконання етапів культивування

Програма не виконує протоколів обміну з зовнішніми системами та не обробляє мережеві дані, зосереджуючись виключно на локальній логіці керування і забезпеченні стабільних умов функціонування біореактора.

4.4.3 Опис логічної структури

Програма користувача зберігається в оперативній пам'яті контролера та складається з набору функціональних мереж, розміщених у організаційному блоці ОВ1. Усі алгоритми поділені за призначенням, щоб забезпечити зрозумілу структуру та можливість подальшої підтримки.

Логічна схема включає такі основні частини:

- мережі перетворення аналогових сигналів від датчиків температури, рН, рівня, розчиненого кисню, тиску та витрати повітря;
- мережі керування виконавчими механізмами, де реалізовано роботу клапанів та насосів через порогові умови та RS-тригери;
- мережу аварійного захисту, що формує сигнал «Аварія» на основі

критичних відхилень технологічних параметрів.

Кожен технологічний канал реалізований окремим набором порівнянь та тригерів. Такий підхід дозволяє чітко розділити функції та спростити введення програми в експлуатацію.

Всі алгоритми створені мовою FBD, оскільки вона наочно відображає структуру блоків, порівнянь та з'єднань між ними, що полегшує налагодження та зменшує ймовірність помилок, характерних для текстових мов. Додатково в структурі програми виділено окремий функціональний блок, реалізований мовою SCL, який виконує логіку послідовних переходів між етапами технологічного процесу у вигляді кінцевого автомата станів.

4.4.4 Використані технічні засоби

Для виконання програми потрібні: модуль контролера S7-1214C AC/DC/Rly - 1 шт.; 1231 AI (4×AI) - 3 шт.; Siemens PM1207 - 1 шт.

4.4.5 Вхідні та вихідні дані

Таблиця 4.1 - вхідні та вихідні дані FB_Scale

| № | Найменування сигналу | Позначення | Тип даних | Одиниці вимірювання | Опис |
|-------------|---------------------------|------------|-----------|---------------------|---|
| Вхідні дані | | | | | |
| 1 | Сире значення АЦП | RAW | INT | відн. од. | Вхідне значення з аналого-цифрового перетворювача |
| 2 | Мінімальне сире значення | MIN_RAW | INT | відн. од. | Нижня межа діапазону АЦП |
| 3 | Максимальне сире значення | MAX_RAW | INT | відн. од. | Верхня межа діапазону АЦП |

Продовження таблиці 4.1

| | | | | | |
|--------------|---------------------------------|-----------|------|----------|--|
| 4 | Мінімальне масштабове значення | SCALE_MIN | REAL | фіз. од. | Мінімальне значення фізичної величини |
| 5 | Максимальне масштабове значення | SCALE_MAX | REAL | фіз. од. | Максимальне значення фізичної величини |
| Вихідні дані | | | | | |
| 1 | Масштабоване значення | OUT_VALUE | REAL | фіз.од. | Значення після лінійного масштабування |

Таблиця 4.2 – Вхідні та вихідні дані FB_YeastBatchControl

| № | Найменування сигналу | Позначення | Тип даних | Одиниці вимірювання | Опис |
|-------------|------------------------|-----------------|-----------|---------------------|---|
| Вхідні дані | | | | | |
| 1 | Сигнал запуску процесу | StartProcess | BOOL | – | Команда запуску циклу ферментації |
| 2 | Сигнал скидання | ResetProcess | BOOL | – | Аварійний або ручний скидання алгоритму |
| 3 | Датчик верхнього рівня | LevelSensorHigh | BOOL | – | Сигнал досягнення максимального рівня |

Продовження таблиці 4.2

| | | | | | |
|--------------|-----------------------------|---------------------|------|---|---|
| 4 | Час ферментації | FermentationTimeSet | TIME | c | Задана тривалість ферментації |
| 5 | Час відкачування | PumpOutTimeSet | TIME | c | Задана тривалість відкачування дріжджів |
| Вихідні дані | | | | | |
| 1 | Насос відкачування активний | PumpOutActive | BOOL | – | Керування насосом відкачування |
| 2 | Додавання субстрату | AddSubstrate | BOOL | – | Керування подачею субстрату |
| 3 | Додавання води | AddWater | BOOL | – | Керування подачею води |
| 4 | Завершення ферментації | FermentationDone | BOOL | – | Ознака завершення процесу |
| 5 | Процес активний | ProcessActive | BOOL | – | Загальний статус роботи алгоритму |
| 6 | Код стану | StateOut | INT | – | Поточний стан алгоритму керування |

4.4.6 Виклик та завантаження

Завантаження програми здійснюється з персонального комп'ютера через середовище ПІА Portal V.16 за допомогою мережевого підключення Ethernet.

Після перенесення програми логіка автоматично записується в енергонезалежну пам'ять контролера, тому при подальших увімкненнях живлення повторного налаштування не потребує.

У якості точки входу використовується Network 1 OB1, після чого послідовно виконуються всі інші мережі програми згідно з їхньою нумерацією.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Формування вимог до експерименту

У ході експерименту моделюється робота реальної системи керування шляхом подачі на входи контролера цифрових значень, що відповідають сигналам аналогових датчиків технологічних параметрів. Задані значення охоплюють як номінальні режими роботи, так і граничні та недопустимі стани, що дозволяє перевірити коректність роботи алгоритмів керування в різних умовах та оцінити реакцію системи на зміну технологічних параметрів. Додатково спрямований на підтвердження коректної роботи алгоритму автономного керування, реалізованого мовою SCL, зокрема послідовності переходів між етапами технологічного процесу.

Масштабування цифрових значень АЦП здійснюється відповідно до прийнятої математичної моделі, що забезпечує приведення сигналів до інженерних одиниць вимірювання. Результати перетворення контролюються в режимі онлайн-моніторингу змінних за допомогою інструментів Watch and Force tables, що дає змогу оцінити адекватність реалізованої моделі перед подальшим її використанням. У процесі експерименту перевіряється робота логіки керування виконавчими механізмами, зокрема системами охолодження, циркуляції, аерації та дозування луку, а також коректність формування керуючих сигналів у відповідь на зміну вхідних параметрів.

Метою експерименту є дослідним шляхом перевірити працездатність розробленої математичної моделі перетворення аналогових сигналів та коректність реалізації алгоритмів керування технологічними параметрами біореактора у програмному середовищі Siemens TIA Portal.

5.2 Підготовка експерименту

Для проведення досліджень буде використано:

- персональний комп'ютер з встановленим середовищем розробки й відлагодження Siemens TIA Portal V16;

- проєкт KyrychenkoMag, завантажений в середовище Siemens TIA Portal V16, який включає відлагоджене ПЗ в складі контролера S7-1214C та додаткових модулів введення і виведення, специфікація яких представлена у таблиці 5.1;

- програмний симулятор промислового контролера S7-PLCSim V16, встановлений на той же ПК.

Таблиця 5.1 - Специфікація комплексу технічних засобів

| № | Найменування | Кількість |
|---|--|-----------|
| 1 | Контролер Siemens S7-1200 CPU 1214C AC/DC/Rly | 1 |
| 2 | Модуль аналогового введення Siemens SM 1231 AI 4×AI | 2 |
| 3 | Блок живлення Siemens PM1207, 24 V DC | 1 |
| 4 | Панель оператора Siemens KTP1200 Basic PN | 1 |

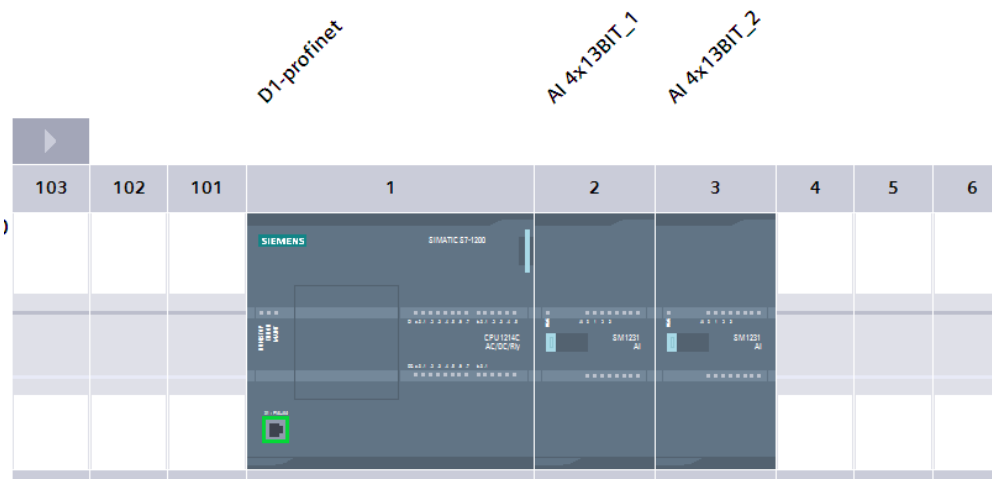


Рисунок 5.1 – КТЗ КС в проєкті

5.3 Контрольний приклад для проведення

Програма та методика експерименту спрямовані на перевірку

працездатності розробленого програмного забезпечення керування біореактором, реалізованого в середовищі Siemens TIA Portal для контролера S7-1200.

5.3.1 Підготовчі операції

Таблиця 5.2 – Послідовність дій при підготовці до роботи та запуску

| № | Дія | Результат |
|---|---|---|
| 1 | Перевірити цілісність електричних з'єднань, правильність підключення датчиків та наявність напруги живлення 220 В | Цілісність з'єднань не порушена, напруга живлення знаходиться в допустимому діапазоні |
| 2 | Увімкнути персональний комп'ютер оператора | Комп'ютер увімкнено, операційна система завантажена |
| 3 | Запустити середовище програмування Siemens TIA Portal V16 | На екрані відкрито інтерфейс TIA Portal |
| 4 | Відкрити проєкт керування біореактором | Проєкт успішно завантажено, структура програмних блоків відображена |
| 5 | Запустити симулятор S7-PLCSIM | Симулятор активний, контролер доступний для запуску |
| 6 | Перевести контролер у режим RUN | Контролер перейшов у режим виконання програми |
| 7 | У середовищі TIA Portal натиснути кнопку Go online | Встановлено з'єднання з контролером, активовано онлайн-моніторинг |

Продовження таблиці 5.2

| | | |
|---|---|--|
| 8 | Відкрити OB_Main та увімкнути режим моніторингу | Поточні значення змінних відображаються в реальному часі |
|---|---|--|

5.3.2 Дослідження алгоритму керування температурою та клапаном охолодження

Даний етап експерименту перевіряє коректність роботи алгоритму керування температурним режимом шляхом впливу на клапан охолодження Q_KV_COOL. Перед початком експерименту програму було переведено в робочий режим, а всі аварійні сигнали були відсутні. Процес обробки аналогових сигналів із переведенням у фізичні значення зображені на рисунку 5.2.

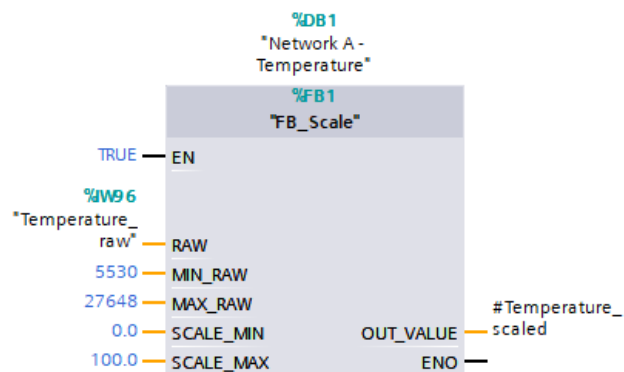


Рисунок 5.2 – Отримання Temperature_Scaled

Таблиця 5.3 - Результати експериментального дослідження керування охолодженням

| № | Дія | Результат |
|---|--|---|
| 1 | Увімкнено онлайн-моніторинг блоку FB_Scale (Temperature) | Відображаються поточні значення RAW та Temperature_scaled |
| 2 | Встановлено Temperature_raw = 3000 | Значення Temperature_scaled \approx 28 °C, клапан охолодження Q_KV_COOL = 0 |

Продовження таблиці 5.3

| | | |
|---|---------------------------------------|---|
| 3 | Змінено $Temperature_raw = 4200$ | $Temperature_scaled \approx 32$ °C, температура нижче порогу, охолодження вимкнене |
| 4 | Встановлено $Temperature_raw = 4600$ | $Temperature_scaled \approx 35$ °C, спрацьовує умова S1 RS-тригера, $Q_KV_COOL = 1$ |
| 5 | Збільшено $Temperature_raw = 5200$ | $Temperature_scaled \approx 40$ °C, клапан залишається відкритим |
| 6 | Зменшено $Temperature_raw = 4400$ | $Temperature_scaled \approx 33-34$ °C, стан клапана не змінюється |
| 7 | Встановлено $Temperature_raw = 4100$ | $Temperature_scaled \approx 32$ °C, формується сигнал R RS-тригера, $Q_KV_COOL = 0$ |
| 8 | Перевірено декілька циклів зміни RAW | Алгоритм працює стабільно, залипання виходу не виявлено |

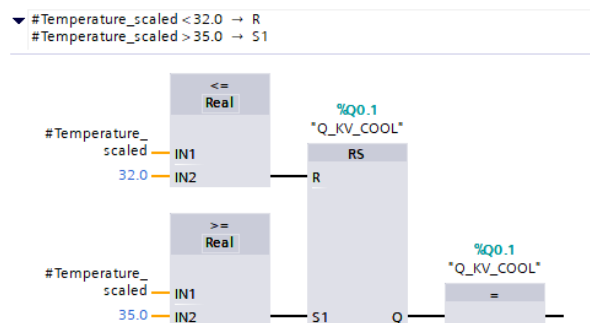


Рисунок 5.3 – Клапан охолодження в Main OB

5.3.3 Дослідження алгоритму керування рівнем суспензії та насосом циркуляції

Таблиця 5.4 - Дослідження роботи сигналу рівня

| № | Дія | Результат |
|---|--|---|
| 1 | Увімкнено онлайн-моніторинг блоку FB_Scale (Level) | Відображаються поточні значення Level_raw та Level_scaled |
| 2 | Встановлено Level_raw = 2800 | Level_scaled \approx 3.2, насос циркуляції вимкнений |
| 3 | Змінено Level_raw = 3400 | Level_scaled \approx 4.8, насос не вмикається |
| 4 | Встановлено Level_raw = 3600 | Level_scaled \approx 5.0, досягнуто нижнього порогу |
| 5 | Змінено Level_raw = 3900 | Level_scaled \approx 6.2, формується сигнал S1 RS-тригера |
| 6 | Зафіксовано стан Q_PUMP_CIRC = 1 | Насос циркуляції увімкнений |
| 7 | Зменшено Level_raw = 3500 | Level_scaled \approx 5.2, насос залишається активним |
| 8 | Зменшено Level_raw = 3200 | Level_scaled \approx 4.0, формується сигнал R RS-тригера, насос вимикається |
| 9 | Перевірено декілька циклів зміни RAW | Алгоритм працює стабільно |

5.3.4 Дослідження алгоритму контролю рН та дозування лугу

Таблиця 5.5 – Дослідження роботи алгоритму контролю рН

| № | Задана дія | Результат роботи системи |
|---|--------------------------------------|---|
| 1 | Встановлено $pH_{raw} = 2900$ | $pH_{scaled} \approx 6.8$, дозатор лугу вимкнений |
| 2 | Опустимо $pH_{raw} = 2700$ | $pH_{scaled} \approx 6.4$, система у нормальному режимі |
| 3 | Встановлено $pH_{raw} = 2500$ | $pH_{scaled} \approx 6.0$, досягнуто нижнього допустимого значення |
| 4 | Змінено $pH_{raw} = 2350$ | $pH_{scaled} \approx 5.8$, формується сигнал S RS-тригера |
| 5 | Зафіксовано стан $Q_{KV_LYE} = 1$ | Дозатор лугу увімкнений |
| 6 | Змінено $pH_{raw} = 2450$ | $pH_{scaled} \approx 6.1$, дозатор продовжує роботу |
| 7 | Встановлено $pH_{raw} = 2650$ | $pH_{scaled} \approx 6.5$, формується сигнал R RS-тригера |
| 8 | Зафіксовано стан $Q_{KV_LYE} = 1$ | Дозатор лугу вимкнений |
| 9 | Перевірено декілька циклів зміни RAW | Алгоритм працює стабільно |

5.3.5 Дослідження алгоритму контролю розчиненого кисню

Таблиця 5.6 – Дослідження контролю розчиненого кисню

| № | Задана дія | Результат роботи системи |
|---|------------------------------------|---|
| 1 | Встановлено $DO_{raw} = 3600$ | $DO_{scaled} \approx 7.5$ мг/л, аерація вимкнена |
| 2 | Змінено $DO_{raw} = 3300$ | $DO_{scaled} \approx 6.8$ мг/л, система у нормальному режимі |
| 3 | Встановлено $DO_{raw} = 3000$ | $DO_{scaled} \approx 6.0$ мг/л, граничне допустиме значення |
| 4 | Змінено $DO_{raw} = 2800$ | $DO_{scaled} \approx 5.5$ мг/л, формується сигнал S RS-тригера |
| 5 | Зафіксовано стан $Q_{KV_AIR} = 1$ | Система аерації увімкнена |
| 6 | Встановлено $DO_{raw} = 3200$ | $DO_{scaled} \approx 6.5$ мг/л, формується сигнал R RS-тригера |
| 7 | Зафіксовано стан $Q_{KV_AIR} = 0$ | Система аерації вимкнена |

5.3.6 Дослідження клапану тиску у реакторі

Таблиця 5.7 - Дослідження алгоритму керування клапаном за тиском

| № | Задана дія | Результат роботи системи |
|---|-------------------------------------|--|
| 1 | Встановлено $Pressure_{raw} = 2100$ | $Pressure_{scaled} \approx 1.0$ бар, клапан $Q_{KV_SUB} = 0$ |

Продовження таблиці 5.7

| | | |
|---|------------------------------------|--|
| 2 | Змінено $Pressure_raw = 2600$ | $Pressure_scaled \approx 1.3$ бар, стан клапана не змінюється |
| 3 | Встановлено $Pressure_raw = 3000$ | $Pressure_scaled \approx 1.5$ бар, клапан залишається закритим |
| 4 | Змінено $Pressure_raw = 3200$ | $Pressure_scaled \approx 1.6$ бар, формується сигнал S RS-тригера |
| 5 | Зафіксовано $Q_KV_Pressure = 1$ | Клапан відкрито для зниження тиску |
| 6 | Зменшено $Pressure_raw = 2900$ | $Pressure_scaled \approx 1.45$ бар, клапан залишається відкритим |
| 7 | Зменшено $Pressure_raw = 2600$ | $Pressure_scaled \approx 1.3$ бар, формується сигнал R RS-тригера |
| 8 | Зафіксовано $Q_KV_Pressure = 0$ | Клапан закрито |
| 9 | Змінено $Pressure_raw = 2300$ | $Pressure_scaled \approx 1.15$ бар, система працює стабільно |

5.3.7 Дослідження роботи алгоритму формування аварійного сигналу

У розробленій схемі аварійної сигналізації зображеної на рисунку 5.3 реалізовано контроль декількох критичних технологічних параметрів: розчиненого кисню, температури, рівня суспензії та кислотності середовища. Кожен параметр перевіряється окремим блоком порівняння, а їх результати подаються на логічний блок “ ≥ 1 ”, який виконує функцію логічного АБО.

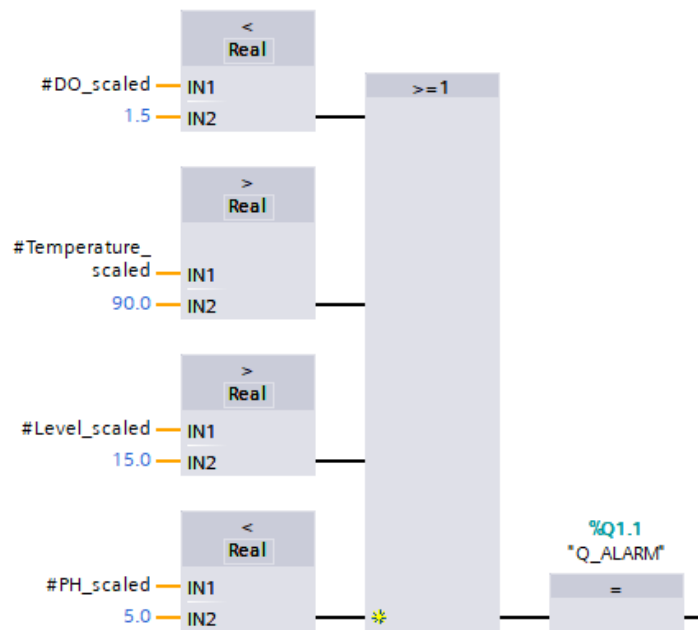


Рисунок 5.3 – Аварійна сигналізація

Аварійний сигнал Q_ALARM активується у випадку виконання хоча б однієї з аварійних умов, що дозволяє оперативно інформувати оператора про небезпечний режим роботи біореактора незалежно від типу відхилення параметра перебіг роботи представлений в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Дослідження роботи аварійного сигналу

| № | Задана дія | Результат роботи програми |
|---|----------------------------------|--|
| 1 | Встановлено DO_scaled = 2.5 мг/л | Умова DO < 1.5 не виконується, аварійний сигнал відсутній |
| 2 | Змінено DO_scaled = 1.2 мг/л | Умова DO < 1.5 виконується, на вході блоку “>=1” з’являється активний сигнал |
| 3 | Зафіксовано стан виходу | Q_ALARM = 1, аварійна сигналізація активована |

Продовження таблиці 5.8

| | | |
|----|--|--|
| 4 | Відновлено DO_scaled = 2.0 мг/л | Умова по DO знімається, але перевіряються інші канали |
| 5 | Встановлено Temperature_scaled = 95 °C | Виконується умова Temperature > 90, аварія знову активна |
| 6 | Зменшено Temperature_scaled = 60 °C | Температурна умова не виконується |
| 7 | Встановлено Level_scaled = 18 % | Виконується умова Level > 15, аварійний сигнал активний |
| 8 | Зменшено Level_scaled = 10 % | Умова рівня не виконується |
| 9 | Встановлено PH_scaled = 4.8 | Виконується умова pH < 5.0, аварія активується |
| 10 | Відновлено PH_scaled = 6.5 | Усі аварійні умови зняті |
| 11 | Зафіксовано фінальний стан | Q_ALARM = 0, система працює у штатному режимі |

5.3.8 Дослідження роботи розробленого алгоритму автономного керування біореактором

У даному пункті виконано дослідження роботи розробленого алгоритму автономного керування дріжджовим біореактором, реалізованого мовою SCL у середовищі TIA Portal. Алгоритм побудований у вигляді кінцевого автомата станів та забезпечує послідовне виконання етапів культивування дріжджової партії, формування дозволу на частковий відбір біомаси, керування процесом

відкачування та автоматичного дозування субстрату і води. (таблиця 5.9)

Таблиця 5.9 – Дослідження роботи розробленого алгоритму автономного керування

| № | Задана дія | Результат роботи системи |
|---|---|--|
| 1 | Встановлено <code>StartProcess = TRUE</code> | Алгоритм переходить у стан культивування, <code>ProcessActive = TRUE</code> , запускається відлік часу ферментації |
| 2 | Відлік часу досяг значення <code>FermentationTimeSet</code> | Формується сигнал <code>FermentationDone = TRUE</code> , виконано перехід до стану готовності до відбору біомаси |
| 3 | Залишено <code>LevelSensorHigh = FALSE</code> | Система переходить у стан часткового відбору, насос відкачування залишається вимкненим |
| 4 | Встановлено <code>LevelSensorHigh = TRUE</code> | Активується логіка завершення відбору, формується дозвіл на дозування води та субстрату |
| 5 | Активний стан дозування | Виходи <code>AddWater = TRUE</code> та <code>AddSubstrate = TRUE</code> , відбувається відновлення об'єму середовища |
| 6 | Досягнуто верхнього рівня в реакторі | Дозування води та субстрату припиняється, система готується до наступного циклу |
| 7 | Завершено цикл керування | Алгоритм автоматично повертається у початковий стан, система готова до нового циклу культивування |

На рисунках 5.4 – 5.7 представлено моніторинг перебігу станів (1-4) в розділі `WatchTables`

| Name | Address | Display format | Monitor value | Modify value | Comment | Tag comment |
|--------------------|---------|----------------|---------------|--------------|-----------------------|-------------|
| *FB_YeastBatc... | | Bool | TRUE | | Start Process | |
| *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Reset Process | |
| *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Level Sensor High | |
| *FB_YeastBatchC... | | Time | T# 10S | | Fermentation Time Set | |
| *FB_YeastBatchC... | | Time | T# 5S | | Pump Out Time Set | |
| *FB_YeastBatchC... | | DEC+/- | 1 | | Стан (1-4) | |
| *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | Process Active | |
| *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | FermentationDone | |
| *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | PumpOutActive | |
| *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | AddSubstrate | |
| *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Add Water | |

Рисунок 5.4 – Стан 1

| Name | Address | Display format | Monitor value | Modify value | Comment | Tag comment |
|-----------------------|---------|----------------|---------------|--------------|-----------------------|-------------|
| 1 *FB_YeastBatc... | | Bool | TRUE | | Start Process | |
| 2 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Reset Process | |
| 3 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Level Sensor High | |
| 4 *FB_YeastBatchC... | | Time | T# 10S | | Fermentation Time Set | |
| 5 *FB_YeastBatchC... | | Time | T# 5S | | Pump Out Time Set | |
| 6 *FB_YeastBatchC... | | DEC+/- | 2 | | Стан (1-4) | |
| 7 *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | Process Active | |
| 8 *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | FermentationDone | |
| 9 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | PumpOutActive | |
| 10 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | AddSubstrate | |
| 11 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Add Water | |
| 12 <Add new> | | | | | | |

Рисунок 5.5 – Стан 2

| Name | Address | Display format | Monitor value | Modify value | Comment | Tag comment |
|-----------------------|---------|----------------|---------------|--------------|-----------------------|-------------|
| 1 *FB_YeastBatc... | | Bool | TRUE | | Start Process | |
| 2 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Reset Process | |
| 3 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Level Sensor High | |
| 4 *FB_YeastBatchC... | | Time | T# 10S | | Fermentation Time Set | |
| 5 *FB_YeastBatchC... | | Time | T# 5S | | Pump Out Time Set | |
| 6 *FB_YeastBatchC... | | DEC+/- | 3 | | Стан (1-4) | |
| 7 *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | Process Active | |
| 8 *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | FermentationDone | |
| 9 *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | PumpOutActive | |
| 10 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | AddSubstrate | |
| 11 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Add Water | |
| 12 <Add new> | | | | | | |

Рисунок 5.6 – Стан 3

| Name | Address | Display format | Monitor value | Modify value | Comment | Tag comment |
|-----------------------|---------|----------------|-------------------------------|--------------|-----------------------|-------------|
| 1 *FB_YeastBatc... | | Bool | TRUE | | Start Process | |
| 2 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | Reset Process | |
| 3 *FB_YeastBatchC... | | Bool | Bit address has the value: 1. | | Level Sensor High | |
| 4 *FB_YeastBatchC... | | Time | T# 10S | | Fermentation Time Set | |
| 5 *FB_YeastBatchC... | | Time | T# 5S | | Pump Out Time Set | |
| 6 *FB_YeastBatchC... | | DEC+/- | 4 | | Стан (1-4) | |
| 7 *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | Process Active | |
| 8 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | FermentationDone | |
| 9 *FB_YeastBatchC... | | Bool | FALSE | | PumpOutActive | |
| 10 *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | AddSubstrate | |
| 11 *FB_YeastBatchC... | | Bool | TRUE | | Add Water | |
| 12 <Add new> | | | | | | |

Рисунок 5.7 – Стан 4

5.4 Аналіз результат експерименту

У процесі експериментальних досліджень було перевірено роботу алгоритмів обробки аналогових сигналів та формування керуючих і аварійних впливів у середовищі TIA Portal. Шляхом зміни значень вхідних сигналів підтверджено коректність масштабування та правильність спрацювання блоків порівняння при досягненні заданих порогів. Встановлено, що алгоритм автономного керування працює стабільно та забезпечує правильну послідовність виконання етапів технологічного процесу без участі оператора.

Перевірка контурів керування охолодженням, циркуляцією та подачею реагентів показала стабільну роботу логіки керування. Використання RS-тригерів забезпечило фіксацію станів виконавчих механізмів та виключило нестійке перемикання при коливаннях параметрів поблизу граничних значень.

Результати експериментів підтвердили, що розроблена програма коректно реалізує задані умови керування та аварійної сигналізації і може бути використана для моделювання та аналізу роботи системи автоматизованого керування біореактором.

ВИСНОВОК

Кваліфікаційна робота є завершеною науковою роботою, в якій вирішена науково-практична задача обґрунтування структури та параметрів кіберфізичної системи керування ділянкою дріжджових реакторів у складі лінії з виготовлення спирту шляхом застосування сучасних методів автоматизації, моделювання та обробки технологічної інформації. Основні висновки і результати роботи полягають у наступному.

У межах магістерської кваліфікаційної роботи виконано аналіз технологічного процесу ферментації та визначено функціональне значення ділянки дріжджових реакторів у загальному виробничому циклі спиртового виробництва. Встановлено, що використання ручних і напівавтоматичних методів керування не забезпечує необхідної стабільності технологічних параметрів через обмежену оперативність реагування та значний вплив людського фактора. Проаналізовано сучасні підходи до керування ферментаційними процесами та обґрунтовано доцільність застосування адаптивних і ситуаційних алгоритмів у складі кіберфізичної системи.

У процесі синтезу системи розроблено структурну, функціональну та принципову схеми кіберфізичної системи ділянки дріжджових реакторів. Визначено склад технічних засобів автоматизації, включаючи вимірювальні прилади, програмований логічний контролер, виконавчі механізми та людино-машинний інтерфейс, а також канали збору й передавання даних. Запропонована структура забезпечує узгоджену роботу всіх компонентів системи в межах єдиного керуючого комплексу.

Окрему увагу приділено розробленню програмного забезпечення кіберфізичної системи. Реалізовані алгоритми забезпечують безперервний моніторинг технологічних параметрів, обробку поточних даних, формування керуючих впливів і аварійних повідомлень, що підвищує надійність та інформативність процесу керування.

У межах експериментального розділу виконано перевірку працездатності

запропонованої кіберфізичної системи та оцінено коректність функціонування алгоритмів керування. Результати моделювання та тестування підтверджують адекватність побудованої моделі та ефективність запропонованих рішень щодо стабілізації параметрів процесу ферментації. Узагальнюючи результати досліджень, можна стверджувати, що поставлену мету магістерської кваліфікаційної роботи досягнуто, а всі завдання, сформульовані у вступі, виконані в повному обсязі.

Подальший розвиток отриманих результатів доцільно спрямувати на розширення функціональних можливостей кіберфізичної системи шляхом використання прогностичних моделей та методів машинного навчання, інтеграцію з системами верхнього рівня SCADA і корпоративними інформаційними платформами, а також проведення дослідної експлуатації в умовах реального виробництва для уточнення параметрів регулювання та оцінки економічної ефективності впровадження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технологія спиртового виробництва : навчальний посібник / за ред. В. М. Шияна. — Київ : НУХТ, 2019. — 328 с.
2. ДСТУ 4221:2023. Спирт етиловий ректифікований. Технічні умови. — Київ : Міністерство економіки України, 2023.
3. Кравченко О. І. Технологія спиртового виробництва. — Київ : Центр учбової літератури, 2019. — 272 с.
4. Мельник В. Г. Технологія спиртового виробництва. — Київ : Центр учбової літератури, 2020. — 296 с.
5. Гурський М. П., Кравченко О. І. Основи технології переробки зерна. — Харків : ХТТ, 2018. — 352 с.
6. Чорноус А. В. Біотехнологічні процеси спиртового виробництва. — Львів : ЛНУТ, 2019. — 240 с.
7. Технічний каталог обладнання для спиртового виробництва. — Київ : ДП «Укрспирт», 2022. — 64 с.
8. Endress+Hauser. Датчик температури iTHERM TM411 : технічна документація [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://eltra-trade.com/products/endress-hauser-itherm-tm411>
9. Siemens AG. Радарний рівнемір SITRANS LR250 : технічний опис [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.avigan.com.ua/page/sitrans-lr250/mp/19465/>
10. Emerson Automation Solutions. Перетворювач тиску Rosemount 3051S : технічний опис [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.instrumart.com/products/38847/rosemount-3051s-in-line-pressure-transmitter>
11. Grundfos. Дозувальний насос серії DDA : каталог продукції [Електронний ресурс]. — Режим доступу:

<https://www.vicaqua.com.ua/ua/catalog/grundfos/dda/97722044/> (дата звернення: 17.12.2025).

12. Bürkert. Клапан керування типу 6213 : керівництво користувача [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.burkert.com/en/Media/plm/MAN/MA/ma6213-manual-eu-en.pdf> (дата звернення: 17.12.2025).

13. Endress+Hauser. Датчик рН Memosens CPS11D : огляд продукції [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.casc.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/liquid-analysis-product-overview/memosens-datchik-pH-CPS11D>

14. Доран П. М. Основи біоінженерії процесів : навчальний посібник. — 2-ге вид. — Лондон : Academic Press, 2019. — 473 с.

15. Комітет ISA-88. Пакедне керування: моделі та термінологія. — Research Triangle Park : ISA, 2018.

16. Уокер Г. М. Фізіологія дріжджів та біотехнологія. — Chichester : Wiley-Blackwell, 2019. — 326 с.

17. Стенбері П. Ф., Вітакер А., Холл С. Дж. Основи технології ферментації. — 3-тє вид. — Oxford : Elsevier, 2020. — 832 с.

18. Медіган М. та ін. Біологія мікроорганізмів Брока. — 15-те вид. — Pearson, 2021. — 1088 с.

19. Лі Е. А., Сешія С. А. Вступ до вбудованих систем: підхід кіберфізичних систем. — 2-ге вид. — Cambridge : MIT Press, 2018. — 560 с.

20. Болтон В. Програмовані логічні контролери. — 7-ме вид. — Oxford : Elsevier, 2020. — 480 с.

21. Siemens AG. TIA Portal : інженерний посібник. — Berlin : Siemens, 2020.

22. Siemens AG. Програмований логічний контролер SIMATIC S7-1200 : керівництво користувача. — Berlin : Siemens, 2021.

23. Siemens AG. Промислові компоненти автоматизації : технічна документація [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/91696622> (дата звернення: 17.12.2025).

24. Siemens AG. TIA Portal : введення в експлуатацію та діагностика. — Berlin : Siemens, 2020.

Додаток А

Код програми FUNCTION_BLOCK FB_Scale

VAR_INPUT

RAW : INT; // Сире значення з АЦП

MIN_RAW : INT; // Мінімальне сире значення

MAX_RAW : INT; // Максимальне сире значення

SCALE_MIN : REAL; // Мінімальне значення фізичної величини

SCALE_MAX : REAL; // Максимальне значення фізичної величини

END_VAR

VAR_OUTPUT

OUT_VALUE : REAL; // Масштабоване значення

END_VAR

VAR_IN_OUT

// Відсутні

END_VAR

VAR

// Статичні змінні відсутні

END_VAR

VAR_TEMP

// Тимчасові змінні відсутні

END_VAR

OUT_VALUE :=

SCALE_MIN +

(INT_TO_REAL(RAW - MIN_RAW) *

(SCALE_MAX - SCALE_MIN) /

INT_TO_REAL(MAX_RAW - MIN_RAW));

Додаток Б

Код програми FB_YeastBatchControl

VAR_INPUT

StartProcess : BOOL; // Запуск процесу

ResetProcess : BOOL; // Скидання процесу

LevelSensorHigh : BOOL; // Датчик верхнього рівня

FermentationTimeSet : TIME; // Час ферментації

PumpOutTimeSet : TIME; // Час відкачування

END_VAR

VAR_OUTPUT

PumpOutActive : BOOL; // Активність насоса відкачування

AddSubstrate : BOOL; // Додавання субстрату

AddWater : BOOL; // Додавання води

FermentationDone : BOOL; // Ознака завершення ферментації

ProcessActive : BOOL; // Процес активний

StateOut : INT; // Поточний стан алгоритму

END_VAR

VAR_IN_OUT

// Відсутні

END_VAR

VAR

```

State      : INT;    // Внутрішній стан автомата
FermentationTON : TON_TIME; // Таймер ферментації
PumpOutTON   : TON_TIME; // Таймер відкачування
PermitTON    : TON_TIME; // Дозвільний таймер
END_VAR

VAR_TEMP
    // Тимчасові змінні відсутні
END_VAR

VAR_CONSTANT
    // Константи не задані
END_VAR

CASE #State OF

    // =====
    // STATE 0 – Очікування запуску
    // =====
0:
    #PumpOutActive := FALSE;
    #AddWater := FALSE;
    #AddSubstrate := FALSE;
    #FermentationDone := FALSE;

```

```
#ProcessActive := FALSE;
```

```
// Скидання таймерів
```

```
#FermentationTON(
```

```
    IN := FALSE,
```

```
    PT := #FermentationTimeSet
```

```
);
```

```
#PumpOutTON(
```

```
    IN := FALSE,
```

```
    PT := #PumpOutTimeSet
```

```
);
```

```
IF #StartProcess THEN
```

```
    #State := 1;
```

```
END_IF;
```

```
// =====
```

```
// STATE 1 – Культивування (таймер ферментації)
```

```
// =====
```

```
1:
```

```
#PumpOutActive := FALSE;
```

```
#AddWater := FALSE;
```

```
#AddSubstrate := FALSE;
```

```
#FermentationDone := FALSE;
```

```
#ProcessActive := TRUE;
```

```
#FermentationTON(
```

```
    IN := TRUE,
```

```
    PT := #FermentationTimeSet
```

```
);
```

```
#PumpOutTON(
```

```
    IN := FALSE,
```

```
    PT := #PumpOutTimeSet
```

```
);
```

```
IF #FermentationTON.Q THEN
```

```
    #FermentationTON(
```

```
        IN := FALSE,
```

```
        PT := #FermentationTimeSet
```

```
    );
```

```
    #FermentationDone := TRUE;
```

```
    #State := 2;
```

```
END_IF;
```

```
// STATE 2 – Дозвіл на частковий відбір біомаси
```

```
// (логічний етап, без HMI)
```

```
// =====
```

```
2:
```

```
#PumpOutActive := FALSE;
```

```
#AddWater := FALSE;
```

```
#AddSubstrate := FALSE;
```

```
#FermentationDone := TRUE;
```

```
#ProcessActive := TRUE;
```

```
#PermitTon(
```

```
    IN := TRUE,
```

```
    PT := T#5s    // дозвіл 5 секунд
```

```
);
```

```
IF #PermitTon.Q THEN
```

```
    #PermitTon(
```

```
        IN := FALSE,
```

```
        PT := T#5s
```

```
    );
```

```
    #State := 3;
```

```
END_IF;
```

```
3:
```

```
#PumpOutActive := TRUE;
```

```
#AddWater := FALSE;

#AddSubstrate := FALSE;

#FermentationDone := TRUE;

#ProcessActive := TRUE;

#FermentationTON(
    IN := FALSE,
    PT := #FermentationTimeSet
);

#PumpOutTON(
    IN := TRUE,
    PT := #PumpOutTimeSet
);

IF #PumpOutTON.Q THEN
    #PumpOutTON(
        IN := FALSE,
        PT := #PumpOutTimeSet
    );
    #PumpOutActive := FALSE;
    #State := 4;
END_IF;
```

```
// =====  
// STATE 4 – Додавання води та субстрату  
// =====  
4:  
#PumpOutActive := FALSE;  
#AddWater := TRUE;  
#AddSubstrate := TRUE;  
#FermentationDone := FALSE;  
#ProcessActive := TRUE;  
  
#FermentationTON(  
    IN := FALSE,  
    PT := #FermentationTimeSet  
);  
  
#PumpOutTON(  
    IN := FALSE,  
    PT := #PumpOutTimeSet  
);  
  
IF #LevelSensorHigh THEN  
    #AddWater := FALSE;  
    #AddSubstrate := FALSE;
```

```
#State := 1; // новий цикл ферментації
```

Додаток Б

```
END_IF;
```

```
END_CASE;
```

```
#StateOut := #State;
```