

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 Шевченка Владислава Івановича
(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 дистиляції-ректифікації 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
(ініціали, прізвище)

« _____ » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістра
(бакалавра, магістра)здобувача вищої освіти Шевченка В.І. академічної групи 123М-24-1
(прізвище та ініціали) (шифр)спеціальності 123 Комп'ютерна інженеріяза освітньою-професійною програмою «Комп'ютерна інженерія»
(офіційна назва)на тему «Обґрунтування структури та параметрів кіберфізичної системи ділянки
дистиляції-ректифікації лінії з виготовлення спирту»,
затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 13.10.2025 №1165-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Стан питання та постановка завдання	На основі матеріалів практик, інших науково-технічних джерел сформулювати наукове завдання, конкретизувати предмет та мету досліджень	10.10.2025
Теоретичний	Обґрунтувати теоретичні основи створення кіберфізичної системи ділянки дистиляції-ректифікації, методи автоматичного контролю та керування технологічними параметрами і принципи взаємодії фізичних та інформаційних компонентів системи.	24.10.2025
Синтез системи	Розробка кіберфізичної системи ділянки дистиляції-ректифікації лінії з виготовлення спирту.	14.11.2025
Розроблення програмного забезпечення	Розробка програмного забезпечення модуля кіберфізичної системи ділянки дистиляції-ректифікації лінії з виготовлення спирту.	28.11.2025
Експериментальний розділ	Проведення та обробка результатів експериментальних досліджень кіберфізичної системи ділянки дистиляції-ректифікації.	05.12.2025

Завдання видано _____
(підпис керівника)доц. С.М. Ткаченко
(ініціали, прізвище)Дата видачі 05 вересня 2025 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії

10.12.2025 р.Прийнято до виконання _____
(підпис здобувача вищої освіти)Шевченко В.І.
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 92 с., 33 рис., 21 табл., 1 дод., 29 джерел.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ДИСТИЛЯЦІЯ-РЕКТИФІКАЦІЯ. ГРАФ, СУСЛО, НМІ.

Об'єкт розробки: – кіберфізична система ділянки дистиляції та ректифікації з виготовлення спирту на виробничій лінії.

Мета роботи – провести аналіз кіберфізичної системи дистиляції-ректифікації з виготовлення спирту на виробничій лінії.

Методи дослідження – аналіз технологічного процесу дистиляції-ректифікації, методи автоматичного керування, логічного та математичного моделювання, теорії графів.

Проведено аналіз існуючих систем автоматизації спиртового виробництва, визначено їх сильні та слабкі сторони і сформульовано потребу у власній кіберфізичній системі керування.

У теоретичному розділі сформовано модель функціонування дистиляційно-ректифікаційної ділянки, описано її структуру, інформаційні зв'язки та логіку взаємодії технологічних об'єктів.

У розділі «Синтез кіберфізичної системи» визначено технічні вимоги, виконано вибір обладнання, побудовано структурну схему та описано взаємодію ключових вузлів.

В експериментальній частині протестовано роботу алгоритмів на основі моделювання технологічних режимів та оцінено ефективність системи.

Практична цінність роботи полягає у підвищенні стабільності, безпеки та точності керування дистиляційно-ректифікаційною ділянкою, а також у зменшенні енерговитрат і впливу людського фактору.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень термінів.....	6
Вступ.....	7
1 Стан питання та постановка завдання.....	9
1.1 Огляд сфери та умов застосування системи.....	9
1.2 Огляд технологій дистиляції-ректифікації з виготовлення спирту..	12
1.3 Огляд а характеристика об'єкта впровадження.....	16
1.4 Аналіз сучасних методів контролю та керування.....	20
1.5 Аналіз допустимих меж та аварійних порогів.....	25
1.6 Обґрунтування напрямку досліджень.....	26
1.7 Постановка задачі.....	27
2 Теоретичний розділ.....	30
2.1 Аналіз функцій і задач кіберфізичної системи.....	30
2.2 Обґрунтування функціональної структури.....	31
2.3 Опис функціональної схеми дистиляціїректифікації.....	34
2.4 Графічне моделювання автоматизації процесів.....	37
2.5 Графічне моделювання роботи дестиляції-ректифікації спирту.....	46
2.6 Графічне моделювання роботи насосу.....	49
3 Синтез кіберфізичної системи.....	52
3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації системи.....	52
3.2 Розробка принципової схеми комплексу технічних засобів.....	53
3.2.1 Аналіз входів та виходів системи.....	53
3.2.2 Обґрунтування елементної бази системи.....	58
3.2.3 Реалізація принципової схеми кіберфізичної системи.....	65
4 Розробка програмного забезпечення.....	68
4.1 Призначення та сфера застосування програмного забезпечення....	68
4.2 Обґрунтування технічних характеристик програми.....	68
4.2.1 Основні функції програми.....	68

4.2.2	Технічні вимоги до роботи програми.....	69
4.2.3	Вхідні дані програми.....	69
4.2.4	Вихідні дані програми.....	70
4.2.5	Технічні засоби та середовище розробки.....	70
4.3	Опис розробленої програми.....	70
4.3.1	Загальні відомості.....	70
4.3.2	Функціональне призначення.....	71
4.3.3	Опис логічної структури програми.....	71
4.3.4	Використані технічні засоби.....	71
4.3.5	Завантаження та виклик.....	72
4.3.6	Вхідні та вихідні дані.....	72
4.4	Оцінка техніко-економічної результативності системи.....	73
5	Експериментальний розділ.....	74
5.1	Мета і завдання експерименту.....	74
5.2	Підготовка експерименту	74
5.3	Програма та методика експериментальних досліджень.....	75
5.3.1	Підготовчі операції.....	76
5.3.2	Приклад і протокол випробувань.....	77
5.3.3	Перевірка роботи насосу.....	81
5.3.4	Перевірка роботи паророзподільника.....	82
5.3.5	Перевірка роботи засувки-клапана.....	84
5.3.6	Перевірка роботи дистиляції-ректифікації.....	85
5.4	Аналіз результату експериментів.....	85
	Висновки.....	87
	Перелік джерел посилань.....	88
	Додаток А. Текст програми кіберфізичної системи ділянки дистиляції-ректифікації лінії з виготовлення спирту.....	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ ТЕРМІНІВ

ТЗ – технічні засоби

ПЧ – перетворювач частоти

ПТО – плановане технічне обслуговування

КФС – кіберфізична система

КТЗ КФС ДР – комплект технічних засобів кіберфізичної системи
дистиляції ректифікації

АСУ – автоматизована система управління

АРМ ДДР – автоматизоване робоче місце ділянки дистиляції-ректифікації

АРМ – автоматизоване робоче місце

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (система
диспетчерського контролю та збору даних)

PLC – програмований логічний контролер

PID – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор (ПІД-
регулювання)

MPC – Model Predictive Control (прогнозне керування)

IT – інформаційні технології

HMI – Human-Machine Interface (людино-машинний інтерфейс)

ВСТУП

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є обґрунтування структури та параметрів кіберфізичної системи керування ділянкою дистиляції-ректифікації спиртового виробництва, а також розроблення моделей і алгоритмів автоматизованого керування, що забезпечують стабільність технологічних режимів, якість продукції та безпечність експлуатації обладнання.*

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити технологічний процес дистиляції та ректифікації спирту як об'єкт автоматизованого керування;
- проаналізувати принципи роботи основного та допоміжного обладнання дистиляційно-ректифікаційної ділянки;
- визначити основні технологічні параметри та сигнали, що підлягають автоматичному контролю і регулюванню;
- розробити функціональну та структурну схеми кіберфізичної системи керування;
- побудувати формалізовані графи станів, що описують режими роботи обладнання та переходи між ними;
- обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації та їх параметрів;
- розробити програмне забезпечення для реалізації алгоритмів керування;
- виконати експериментальну перевірку працездатності запропонованих алгоритмів і графів.

Об'єкт дослідження – технологічний процес дистиляції та ректифікації спирту на виробничій лінії.

Предмет дослідження – структура, параметри та алгоритми керування кіберфізичної системи дистиляційно-ректифікаційної ділянки.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети у роботі використано методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, теорії графів станів, моделювання технологічних процесів, а також методи математичної статистики та інженерного аналізу.

Наукові положення:

1. Дистиляційно-ректифікаційна ділянка спиртового виробництва може бути представлена у вигляді об'єкта з детермінованими станами, що дозволяє ефективно застосовувати графи-автомати для керування технологічними режимами.

2. Використання кіберфізичної системи з формалізованими алгоритмами керування забезпечує підвищення стабільності технологічних параметрів, безпечності роботи обладнання та зниження впливу людського фактору.

Наукові результати:

1. Розроблено структурну модель кіберфізичної системи керування дистиляційно-ректифікаційною ділянкою з урахуванням особливостей технологічного процесу.

2. Побудовано графи станів, які описують роботу обладнання у нормальних та аварійних режимах.

3. Запропоновано алгоритми автоматизованого керування, що забезпечують узгоджену роботу технологічних апаратів і допоміжних пристроїв.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджуються використанням відомих методів теорії автоматичного керування, коректністю побудованих моделей, а також результатами експериментальної перевірки працездатності розробленого програмного забезпечення.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої кіберфізичної системи для автоматизованого керування дистиляційно-ректифікаційною ділянкою спиртового виробництва, що дозволяє підвищити якість продукції, знизити енерговитрати та забезпечити безпечну експлуатацію обладнання.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Огляд сфери та умов застосування системи

Ділянка дистиляції-ректифікації є ключовим етапом у виробництві спирту, де відбувається розділення суміші на компоненти за різницею температур кипіння та вмісту летких речовин. Ефективність та стабільність цього процесу визначають якість кінцевого продукту та енерговитрати підприємства. Традиційні системи управління такими процесами часто базуються на стандартних PID-контролерах, що не забезпечує достатньої адаптивності та швидкості реакції при зміні вхідних параметрів або якості сировини [1].

Сфера застосування систем у даному контексті охоплює виробництва спирту різного масштабу, включаючи як промислові лінії великих підприємств, так і середні та малі виробничі потужності, де важлива точність контролю температури, рівнів рідин, тиску та концентрації спирту. Кіберфізичні системи дозволяють інтегрувати сенсорні мережі, виконавчі механізми та алгоритми цифрового контролю, забезпечуючи моніторинг у реальному часі, автоматичну корекцію режимів роботи та прогнозування критичних ситуацій [1].

Умови застосування таких систем передбачають наявність технологічного обладнання, здатного взаємодіяти із сенсорами і виконавчими пристроями (колони ректифікаційні, теплообмінники, насосне обладнання), а також надійну комунікаційну інфраструктуру (локальні мережі, протоколи передачі даних, хмарні платформи для збору та аналізу інформації). Важливим фактором є стабільне енергопостачання та безпечне середовище для встановлення електроніки, що відповідає нормам промислової безпеки та протипожежним вимогам [2].

Застосування систем дозволяє вирішувати низку завдань, що залишаються актуальними для галузі: підвищення точності підтримки параметрів процесу, зменшення енергоспоживання, скорочення часу на переналадку обладнання та зниження ризиків аварійних ситуацій. Впровадження таких систем сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств, поліпшенню якості

продукції та інтеграції технологічних процесів у концепцію «розумного заводу» на базі Індустрії 4.0 [3].

Виробництво спирту включає низку основних технологічних етапів, кожен з яких має критичне значення для якості та ефективності процесу:

1. Підготовка сировини – відбір та підготовка основних компонентів: зернових культур, цукровмісних матеріалів та допоміжних добавок. На цьому етапі забезпечується відповідність сировини стандартам якості та її оптимальна фізико-хімічна характеристика для подальшої переробки.

2. Мелення та затирання сировини – подрібнення зерна або інших матеріалів та їх змішування з водою для утворення однорідного затору, що сприяє кращому виділенню цукрів та підготовці до ферментації.

3. Варіння затору – термічна обробка суміші з метою розщеплення складних вуглеводів на прості цукри, що є доступними для бродильних мікроорганізмів.

4. Фільтрація затору – видалення нерозчинних залишків та осаду для отримання чистого суслу, яке підлягає бродінню.

5. Бродіння суслу – процес перетворення цукрів на спирт та вуглекислий газ за допомогою дріжджових культур, що є ключовим етапом формування вихідної концентрації етанолу.

6. Дистиляція – отримання «сирого» спирту шляхом розділення компонентів суслу на основі різниці температур кипіння, що дозволяє відокремити спирт від води та інших летких сполук.

7. Ректифікація – процес очищення та концентрування спирту до необхідної фортеці, що включає видалення домішок та небажаних компонентів для підвищення чистоти продукту.

8. Очистка та купажування – додаткова очистка спирту за допомогою активованого вугілля або інших сорбентів, а також змішування різних партій для досягнення стабільного смакового та хімічного профілю кінцевого продукту.

9. Розлив та пакування готової продукції – фасування спирту у тари відповідного об’єму та матеріалу, маркування та підготовка до зберігання або реалізації, з урахуванням стандартів безпеки та санітарних норм [4].

Графічне зображення функціональної структури виробничого комплексу, представлено на (рисунку 1.1), має наступний вигляд:



Рисунок 1.1 – Схема виробничого процесу з виготовлення спирту

Схема демонструє загальну організацію та основні технологічні етапи виробничого комплексу для виготовлення спирту.

Спирт можна виготовляти з різної сировини, зокрема зерна, цукрової тростини та картоплі, а вибір матеріалу залежить від технології та регіону виробництва. Зерновий спирт отримують із високоякісної пшениці, жита або кукурудзи: зерно промивають, подрібнюють, змішують з водою і піддають бродінню, після чого проводять дистиляцію та очищення для досягнення високої чистоти продукту. Спирт із цукрової тростини виробляють шляхом ферментації цукрового сиропу, отриманого з тростини, з подальшою дистиляцією та ректифікацією для підвищення якості. Картопляний спирт виготовляють із картопляного крохмалю, який перетворюють на цукор за допомогою ферментів, а потім піддають бродінню, дистиляції та очищенню[5].

Перший етап виробництва передбачає підготовку сировини: її миття, подрібнення та переробку в крохмаль або сироп для бродіння. Під час бродіння дріжджі перетворюють цукри на спирт, а після завершення цього процесу отриманий розчин піддають дистиляції для відокремлення етанолу від води та

домішок. Ректифікація забезпечує багаторазове очищення та високу чистоту продукту. На заключних етапах спирт фільтрують, стабілізують та обробляють спеціальними добавками для поліпшення смакових характеристик, отримуючи готовий високоякісний продукт.

1.2 Огляд технологій дистиляції-ректифікації з виготовлення спирту

Процес виробництва етилового спирту базується на послідовному виділенні, концентруванні та очищенні спиртових парів із бражки. Основними технологічними операціями є дистиляція, ректифікація та конденсація, які забезпечують отримання високоякісного спирту відповідно до вимог стандартів.

Під час кипіння водно-спиртового розчину спостерігається нерівномірний розподіл компонентів у паровій фазі – у парах завжди міститься більше спирту, ніж води. Так, при кипінні бражки з вмістом спирту близько 10% об'ємна частка спирту у парах становить приблизно 51,6%. Якщо випарити третину початкової кількості бражки та зібрати конденсат, отримують водно-спиртову рідину міцністю близько 33%. Для досягнення вищих концентрацій спирту використовується процес ректифікації – багаторазового випаровування та конденсації, що дозволяє відокремити спирт від води та домішок з максимальною ефективністю.

Основним апаратом у системі ректифікації є ректифікаційна колона безперервної дії, яка складається з верхньої зміцнюючої та нижньої вичерпної частини. Колона має суцільнозварний корпус із нержавіючої сталі з оглядовими люками для монтажу, контролю та обслуговування. У нижній частині колони розміщена напівглуха тарілка для відведення рідини та розподілу пари. Усередині встановлені контактні тарілки (їх кількість може перевищувати 100 штук), які забезпечують ефективну взаємодію пари та рідини. Найчастіше застосовують ковпачкові або клапанні тарілки, що забезпечують барботаж пари через шар рідини, завдяки чому відбувається тепло- та масообмін між фазами. Ефективність окремої тарілки може досягати 80–90% [6].

Схема ректифікаційної колони з ковпачковими тарілками включає такі основні потоки: введення початкової суміші, подача флегми, відведення пари та кубової рідини, а також злив і подачу пари у відповідні зони колони. До складу конструкції входять корпус, днище, кришка, тарілки, люки, парові патрубки, капсульні ковпачки, переливні планки та опорні елементи. Це продемонстровано на (рисунку 1.2).

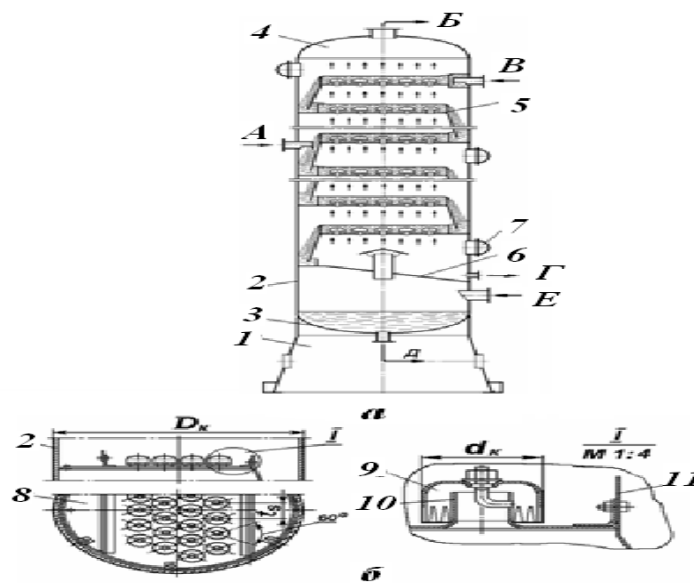


Рисунок 1.2 – Схема ректифікаційної колони

До складу технологічної системи виробництва спирту входить низка основних апаратів і допоміжного обладнання, кожен елемент якого виконує певну функцію в процесі дистиляції та ректифікації [6].

Дистилятор застосовується для випарювання етанолу з бражки, первинного розділення фракцій і концентрування спирту перед подачею на ректифікацію. Він виготовляється з нержавіючої сталі AISI 316L або 304, іноді з міді, оснащується паровими теплообмінниками або електронагрівом. Робоча температура становить близько 100 °С, тиск – від атмосферного до 0,2–1,6 МПа. Об'єм може варіюватися від сотень літрів до десятків кубометрів [7].

Дефлегматор 1 призначений для часткової конденсації парів після дистилятора та повернення флегми в ректифікаційну колону для підвищення концентрації спирту. Це трубчастий або спіральний теплообмінник із

нержавіючої сталі чи міді, що працює з охолоджувальною водою температурою 10–20 °С. Потужність охолодження може сягати сотень кВт [8].

Накопичувач слугує для збору головних, середніх та хвостових фракцій. Він виготовлений із харчової нержавіючої сталі, оснащений датчиками рівня та температури, має герметичну конструкцію, що забезпечує можливість санітарної очистки (CIP) [8].

Ректифікаційна колона є головним апаратом процесу очищення спирту. Вона забезпечує тонке фракційне розділення компонентів шляхом багаторазового випарювання та конденсації. Корпус колони має діаметр від 0,5 до 6 м і висоту до 60 м. У середині встановлені контактні тарілки або насадки, які створюють велику поверхню контакту між парою та рідиною. Робочий тиск зазвичай близький до атмосферного, коефіцієнт ефективності тарілок – 80–90% [9].

Дефлегматор 2 виконує функцію додаткового охолодження спиртових парів після ректифікаційної колони перед остаточною конденсацією. Його конструкція аналогічна першому дефлегматору, але з меншою площею теплообміну [8].

Конденсатор забезпечує перехід пари у рідкий стан. Виконується у вигляді кожухотрубного або пластинчастого теплообмінника з нержавіючої сталі або міді. Температура охолоджувальної води становить 10–15 °С, а конструкція гарантує мінімальний гідравлічний опір і стабільну роботу [8].

Збірник кубового залишку призначений для накопичення невиварених залишків після дистиляції. Він виготовляється з нержавіючої сталі, обладнаний системою контролю рівня та може мати підігрів для утилізації або повторного використання рідини [8].

Холодоагентом у системі виступає вода харчової якості, яка циркулює через дефлегматори й конденсатори, відводячи тепло. Її температура на вході становить 10–25 °С. Конденсат (вода) після теплообміну збирається у спеціальному резервуарі [10].

Резервуар “Спирт на відвантаження” призначений для зберігання готового продукту – спирту. Він має подвійні стінки або охолоджувальний кожух, оснащений датчиками рівня, температури й тиску, а також може бути заповнений інертним газом для запобігання окисленню спирту.

Насоси (НР1–НР5) забезпечують циркуляцію рідин, пари та охолоджувача по системі. Використовуються відцентрові або магнітно-муфтові насоси з корпусом із нержавіючої сталі. Продуктивність варіюється від кількох до сотень кубічних метрів за годину [11].

Датчики рівня (І1–І9) контролюють рівень рідини у колонах, дистиляторах і резервуарах. Застосовуються радарні або ємнісні сенсори з точністю до ± 5 мм. Датчики температури (Т1–Т2) вимірюють температуру у ключових точках процесу за допомогою термопар або термометрів опору Pt100 [12].

Електромагнітні клапани (HV1–HV7) здійснюють регулювання або перекриття потоку рідини. Вони виконані з нержавіючої сталі, мають ущільнення з харчових матеріалів, забезпечують швидке реагування системи керування [13].

Мотори (М1–М2) застосовуються для керування паровими розподільниками та насосами. Це асинхронні двигуни з частотним регулюванням, потужністю від 0,12 до 10 кВт, класом енергоефективності ІЕ2–ІЕ4 [14].

Парові розподільники (РР1, РР2) регулюють потік пари, що піднімається з дистилятора до дефлегматора 1 і далі до ректифікаційної колони, а також з колони до дефлегматора 2. Вони виготовлені з жаростійкої нержавіючої сталі та оснащені моторизованими приводами, що дозволяє автоматично підтримувати стабільність тиску та температури.

Таким чином, технологічна схема дистиляції-ректифікації передбачає узгоджену роботу комплексу апаратів, що забезпечують послідовні етапи випарювання, ректифікації, охолодження та збору спирту. Використання сучасного автоматизованого обладнання дозволяє досягти високої чистоти кінцевого продукту.

1.3 Огляд та характеристика об'єкта впровадження

Об'єктом впровадження є технологічна ділянка дистиляції-ректифікації, на якій здійснюється виробництво спирту. На (рисунку 1.3), представлена принципова схема ділянки, що відображає основні апарати, елементи автоматики та напрямки руху потоків сировини, пари, конденсату й готового продукту. Технологічний процес складається з низки послідовних операцій, у ході яких брага проходить етапи випаровування, часткової та повної конденсації, ректифікації й охолодження, перетворюючись у високоякісний спирт.

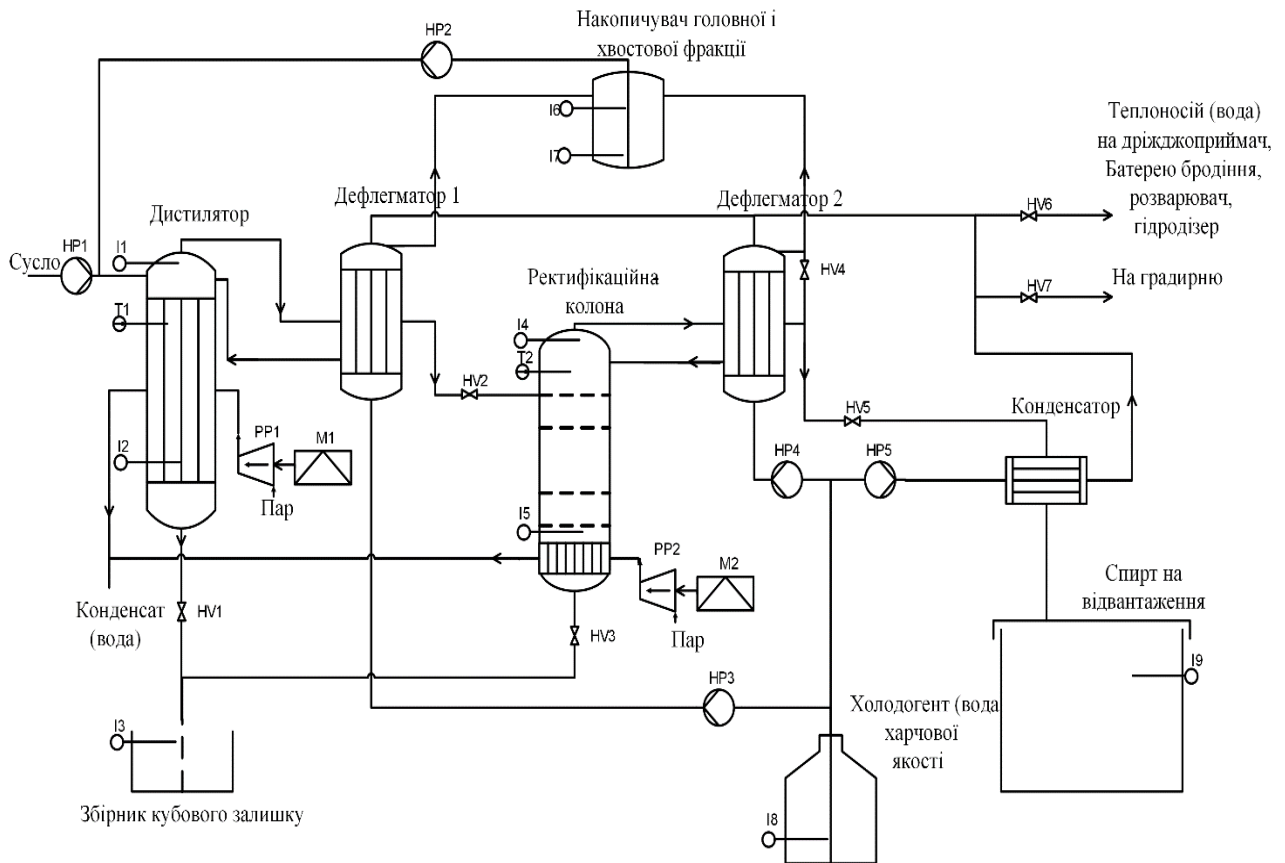


Рисунок 1.3 – Принципова схема ділянки дистиляції –ректифікації спирту

1. Подача сусла до дистилятора:

На першому етапі брага або сусло з концентрацією етанолу 8–12 % подається з бродильного відділення до дистилятора за допомогою насоса НР1, який забезпечує стабільний потік і необхідний тиск подачі. Перед входом у

дистилятор встановлено датчики рівня і тиску (П1) та датчик температури (Т1), що дозволяють системі керування контролювати стан подачі в реальному часі.

Автоматичний регулятор підтримує оптимальний рівень заповнення дистилятора, уникаючи переповнення або нестачі рідини. У разі відхилення параметрів (наприклад, перевищення тиску понад 0,25 МПа або температури понад 40 °С) система подає сигнал тривоги або коригує роботу насоса. Таким чином забезпечується стабільність подачі сировини та підготовка до ефективного випаровування. [15].

2. Дистиляція в дистиляторі

У дистиляторі проводиться первинне випаровування спиртовмісної суміші. Нагрівання здійснюється за допомогою парової сорочки або розподільника пари (РР1), який подає пару під тиском до 0,4 МПа. Теплообмінник М1 забезпечує рівномірне прогрівання усього об'єму рідини, що запобігає локальному перегріву та утворенню осаду [15].

У процесі кипіння легколеткі компоненти (переважно спирт) переходять у парову фазу. Пари піднімаються у верхню частину апарата, тоді як залишкова рідина, що містить важкі домішки, відводиться через клапан НV1 у збірник кубового залишку. Робоча температура кипіння підтримується в межах 78–100 °С, залежно від складу суміші. Ефективність дистиляції залежить від стабільності теплового балансу, який регулюється автоматизованою системою через показники температури, тиску та рівня [16].

3. Часткова конденсація у дефлегматорі 1

Пари, що виходять із дистилятора, надходять у дефлегматор 1, де здійснюється часткова конденсація. У цьому апараті пари охолоджуються за допомогою протитечійного потоку води, унаслідок чого частина парів конденсується й повертається у вигляді флегми.

Цей процес відіграє ключову роль у стабілізації температурного режиму та підвищенні концентрації етанолу. Згідно з робочими характеристиками, температура в дефлегматорі підтримується близько 80 °С, а тиск – до 0,25 МПа.

Флегма, що повертається у дистиллятор, збагачує нижню частину системи рідиною з високим вмістом спирту, що підвищує загальну ефективність дистиляції та зменшує витрати енергії.

4. Ректифікація у колоні

На цьому етапі пари з дефлегматора надходять у ректифікаційну колону, оснащену ковпачковими або сітчастими тарілками, які забезпечують багаторазову взаємодію парової та рідкої фаз.

Ректифікаційна колона розділяє суміш за леткістю компонентів: у нижній частині залишається вода та важкі домішки, а у верхній концентрується етанол із домішками низькокиплячих речовин.

Температура у нижній частині колони сягає 98–100 °С, у середній – близько 85 °С, а у верхній – 78,3 °С. Контроль параметрів здійснюють датчики T2, I4, I5, а стабільну подачу пари підтримують PP2 і M2 [8].

Завдяки цьому процесу досягається очищення спирту до 96 % об., що відповідає технічним вимогам виробництва класу

5. Дефлегмація у дефлегматорі 2

Після ректифікації спиртові пари потрапляють у дефлегматор 2, де відбувається тонке очищення – часткова конденсація залишкових домішок і стабілізація складу спиртових парів.

Охолодження відбувається водою, температура якої контролюється системою автоматизації. Частина сконденсованої рідини повертається у колону, а решта чистої спиртової пари спрямовується у конденсатор.

Дефлегматор другого ступеня дозволяє досягти додаткового очищення спирту до 99,5 % об., зменшуючи вміст сивушних масел і альдегідів [8].

6. Конденсація у конденсаторі

Після дефлегматора 2 спиртові пари потрапляють у конденсатор, де під дією охолоджувальної води переходять у рідкий стан. Охолодження забезпечує насос НР4, який створює циркуляцію води через теплообмінник.

Робоча температура охолодження підтримується в межах 25–30 °С, що дозволяє уникнути втрат спирту через випаровування. Якщо аналіз якості

показує невідповідність вимогам, автоматичний клапан HV4 направляє продукт на повторну ректифікацію [8].

7. Накопичення головної та хвостової фракцій

У процесі ректифікації утворюються побічні фракції – головна (леткі домішки) та хвостова (важкі компоненти). Вони збираються у спеціальному накопичувачі, де їх параметри контролюють датчики I6 та I7.

Головні фракції містять метанол, ацетальдегід та інші легколеткі речовини, які видаляються з технологічного циклу. Хвостові фракції містять воду і важкі спирти, що підлягають утилізації або повторній дистиляції.

Це дозволяє уникнути забруднення основного продукту та забезпечити стабільну якість спирту.

8. Відведення залишкової рідини

Після завершення ректифікації рідина з нижньої частини колони виводиться через клапан HV3 і перекачується насосом HP3 у збірник залишків. Кубовий залишок містить воду, домішки та неетанольні компоненти.

Цей етап забезпечує безперервність технологічного процесу, а залишок може бути використаний у системі рекуперації тепла або переданий на біообробку.

9. Охолодження системи

Система охолодження є замкненим контуром, у якому циркулює харчова вода. Клапани HV5–HV7 і насос HP4 регулюють подачу охолоджувача в конденсатор, дефлегматори та інші теплообмінники.

Після відведення тепла вода направляється у градирню або використовується повторно для обігріву допоміжних ділянок, наприклад, розварювача або ферментаційного апарата. Це дозволяє знизити витрати енергії на 10–15 % [8].

10. Отримання готового продукту

Очищений спирт після конденсації надходить через клапан HV5 у резервуар зберігання, обладнаний датчиками I9 (рівень, тиск, температура). Тут проводиться остаточне охолодження до 20 °С, стабілізація показників і

підготовка до відвантаження.

Готовий продукт відповідає вимогам ДСТУ 4221:2021, має прозорість, відсутність запахів і міцність не нижче 96,3 % об [8].

1.4 Аналіз сучасних методів контролю та керування

У сучасному виробництві спирту процеси дистиляції та ректифікації мають складний багатопараметричний характер, що включає інтенсивні тепло- і масообмінні явища. Від стабільності температури, тиску, рівня рідини та концентрації етанолу безпосередньо залежить якість кінцевого продукту. Тому для забезпечення оптимального режиму роботи технологічної лінії широко застосовуються автоматизовані системи контролю та керування, здатні підтримувати необхідні параметри з високою точністю.

Для процесу дистиляції-ректифікації спирту використовують такі прилади:

Датчик температури РТ100 – це терморезистор платинового типу, призначений для точного вимірювання температури в ключових точках процесу дистиляції та ректифікації. Має високі стабільність і швидку реакцію дозволяє підтримувати оптимальні температурні режими при випаровуванні та конденсації парів спирту (рисунок 1.4), [17].



Рисунок 1.4 – Датчик терморезисторний РТ 100

Технічні характеристики датчика температури:

1. Тип підключення: 3-провідне;
2. Ступінь захисту: IP65 (типово для головки В);

3. Діапазон температури: $-50 \dots +250$ °С;
4. Робочий тиск: до 6.3 МПа;
5. Час відгуку: 15-25с. [17].

Датчик рівня поплавковий використовується для контролю кількості рідини в резервуарах і колонах. Його робота ґрунтується на принципі зміни положення поплавка, який реагує на рівень рідини, передаючи сигнал контролеру. Це забезпечує автоматичне включення насосів і запобігає переповненню або роботі «всуху» (рисунок 1.5), [12].



Рисунок 1.5 – Датчик рівня поплавковий

Технічні характеристики датчика рівня:

1. Тип підключення: Дротове, 2-провідне (NO або NC контакт);
2. Ступінь захисту: IP68;
3. Діапазон температури: $-40 \dots +105$ °С;
4. Робочий тиск: до 2 МПа;
5. Час відгуку: ≈ 1 с (миттєве спрацьовування при зміні рівня) [12].

Електромагнітний клапан виконує функцію дистанційного регулювання потоку пари або рідини. Завдяки електромагнітному керуванню клапан швидко реагує на зміни сигналів ПЛК, що дозволяє точно регулювати процес подачі теплоносія та конденсату (рисунок 1.6), [13].



Рисунок 1.6 – Електромагнітний клапан

Технічні характеристики електромагнітного клапана:

1. Тип підключення: Електричне – котушка 24 V DC або 220 V AC; різьбове або фланцеве гідравлічне з'єднання;
2. Ступінь захисту: IP65;
3. Діапазон температури: Робоче середовище: $-10 \dots +180^{\circ}\text{C}$, температура навколишнього середовища до $+60^{\circ}\text{C}$;
4. Робочий тиск: $0 \dots 16$ МПа;
5. Час відгуку: 20–200 мс. [13].

Насос призначений для транспортування сусли, перекачування залишкових рідин і подачі охолоджуючої води. Керування насосами здійснюється автоматично за допомогою сигналів контролера. У системі передбачено захист від перевантажень і аварійних режимів (рисунок 1.7), [11].



Рисунок 1.7 – Насос

Технічні характеристики насосу:

1. Тип підключення: Трифазне живлення 400 В / 50 Гц;

2. Ступінь захисту: IP55;
3. Діапазон температури: PP – 0...+70 °C
4. PVDF – –10...+100 °C
5. Робочий тиск: до 24 м вод. ст., макс. робочий тиск близько 0,24 Мпа;
6. Час відгуку: не нормується (режим S1 – безперервна робота) [11].

Індуктивний датчик безконтактно визначає наявність або положення металевих об'єктів. Він використовується для контролю стану механічних вузлів або рухомих частин установок. Має високу надійність і довгий термін служби, стійкий до забруднень і вібрацій (рисунок 1.8), [18].



Рисунок 1.8 – Індуктивний датчик

Технічні характеристики індуктивного датчика:

1. Тип підключення: 3-провідний (коричневий + живлення, синій – земля, чорний – вихід);
2. Ступінь захисту: IP65;
3. Діапазон температури: –25 ... +70 °C;
4. Робочий тиск: Не застосовується;
5. Час відгуку: 2 мс. [18].

Контактор – це електромеханічний пристрій для комутації електрообладнання (насосів, клапанів, нагрівачів). Він розділяє силове та керуюче коло, підвищуючи безпеку, витримує високі струми та часто спрацьовує

без значного зносу. У системі дистиляції-ректифікації виконує роль проміжної ланки між контролером і силовими механізмами, (рисунок 1.9), [19].



Рисунок 1.9 – Контактор

Технічні характеристики контактора:

1. Тип підключення: гвинтові термінали;
2. Ступінь захисту: IP20;

Діапазон температури: від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, [19].

Модуль Modbus RTU використовується для з'єднання контролера з іншими пристроями через шину RS485. Завдяки промислового протоколу Modbus RTU забезпечується стабільна передача даних між ПЛК, датчиками та виконавчими модулями навіть на великих відстанях, (рисунок 1.10), [20].



Рисунок 1.10 – Модуль Modbus RTU

Технічні характеристики модуля:

1. Тип підключення: послідовний інтерфейс RS-485;
2. Ступінь захисту: IP67;
3. Діапазон температури: 40 °С ... +85 °С;
4. Час відгуку: залежить від швидкості обміну (baud rate), зазвичай 1–100 мс; типові швидкості – 9600 – 115200 біт/с. [20].

Частотний перетворювач (ЧП) – це електронний пристрій, який використовується для плавного регулювання частоти обертання електродвигуна шляхом зміни частоти та напруги живлення. У системі дистиляції-ректифікації він виконує важливу функцію – забезпечує точне керування швидкістю насосів, вентиляторів або парових розподільників, що дозволяє підтримувати оптимальні параметри процесу в реальному часі (рисунок 1.11), [21].



Рисунок 1.11 – Частотний перетворювач

Технічні характеристики ЧП:

1. Тип підключення: 3-фазне 380–480 В;
2. Ступінь захисту: IP20;
3. Діапазон температури: –10 °С ... +60 °С [21].

1.5 Аналіз допустимих меж та аварійних порогів

Для запобігання перегріву, переповнення апаратів або виходу процесу з-під контролю встановлюються робочі, попереджувальні та аварійні межі параметрів. Це дозволяє системі ПЛК реагувати своєчасно, переходячи в

стабілізаційний або аварійний режим. Продемонстровано у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Допустимі межі та аварійні пороги

Елемент	Робочий діапазон	Попереджувальна межа	Аварійна межа
Дистилятор (Т1)	90–95 °С	> 97 °С	> 100 °С
Дефлегматор 1	80–85 °С	–	> 90 °С
Колона (низ / верх)	100 °С / 78–80 °С	± 2 °С	± 5 °С
Дефлегматор 2	75–82 °С	> 83 °С	> 85 °С
Конденсатор	25–30 °С	> 33 °С	> 35 °С
Рівні у ємностях	30–80 %	> 85 %	> 95 % або < 5 %
Насоси, двигуни	50–100 % частоти	–	Перегрів/перевантаження

1.6 Обґрунтування напрямку досліджень

Процеси дистиляції та ректифікації є основними етапами виробництва спирту, де визначальне значення мають стабільність параметрів і точність регулювання технологічних режимів. Висока якість готового продукту безпосередньо залежить від підтримання оптимальної температури, тиску, рівня рідини та концентрації спирту. Проте традиційні системи автоматизації, що базуються на простих регуляторах, часто не забезпечують достатньої гнучкості та точності у випадках змінних умов виробництва або коливань характеристик сировини.

Це зумовлює необхідність дослідження та впровадження сучасних методів контролю, які дозволяють підтримувати технологічний процес у стабільному режимі навіть за змін зовнішніх факторів. Зокрема, важливим напрямом є удосконалення алгоритмів автоматичного керування, що поєднують класичні методи ПІД-регулювання з адаптивними та прогнозними підходами. Такі системи здатні автоматично реагувати на відхилення параметрів, оптимізуючи подачу тепла та охолоджувальної води для підтримання найкращих умов роботи апаратів.

Перспективним є використання математичних моделей процесів дистиляції та ректифікації, які дають змогу проводити попереднє моделювання і налаштування режимів роботи обладнання без втручання в реальний процес. Це дозволяє зменшити кількість експериментів на виробництві, скоротити енергетичні витрати та підвищити ефективність системи.

Сучасні технологічні комплекси дедалі частіше оснащуються програмно-логічними контролерами (PLC), які забезпечують централізоване керування апаратами, обробку сигналів від численних датчиків і реалізацію складних алгоритмів регулювання. Інтеграція таких систем з програмними комплексами SCADA або MES створює можливість для моніторингу, архівації даних і аналізу ефективності процесу в реальному часі. Це не лише підвищує надійність системи, але й забезпечує можливість гнучкого керування виробничими режимами.

Таким чином, обраний напрям дослідження зосереджений на розробці ефективної системи автоматичного контролю та керування процесом дистиляції-ректифікації. Така система повинна забезпечувати стабільну якість спирту, зменшення енергоспоживання, підвищення продуктивності обладнання та безпечну роботу всієї технологічної лінії.

1.7 Постановка задачі

В Україні виробництво спирту є однією з важливих галузей переробної промисловості, що забезпечує сировину для харчової, фармацевтичної та хімічної промисловості. На сучасних підприємствах процеси дистиляції та ректифікації відіграють ключову роль у формуванні якісного кінцевого продукту. Основна мета технологічної ділянки дистиляції-ректифікації полягає у відділенні спирту від браги, його концентруванні та очищенні від домішок шляхом багатоступеневої перегонки та конденсації.

Процес керування дистиляційно-ректифікаційною ділянкою пов'язаний із регулюванням великої кількості параметрів – температури, тиску, витрати пари, рівня рідин, концентрації спирту та роботи теплообмінного обладнання. Нині

більшість операцій здійснюється за участю оператора, який керується технологічними картами та інструкціями. Проте ці дії часто базуються на досвіді персоналу, що призводить до нестабільності параметрів процесу, перевитрати енергії та зниження якості спирту.

Виникає необхідність створення автоматизованої системи контролю та керування параметрами процесу дистиляції-ректифікації, яка забезпечить стабільну роботу обладнання, підвищить точність регулювання та мінімізує вплив людського фактора.

Мета цієї кваліфікаційної роботи – обґрунтувати структуру та параметри системи автоматичного керування технологічною ділянкою дистиляції-ректифікації для підвищення ефективності процесу та якості спирту.

Основне завдання роботи – розробити методи та засоби керування параметрами технологічних контурів обладнання дистиляційно-ректифікаційної установки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі підзадачі:

1. провести аналіз технологічного обладнання, технологічних процесів дистиляції та ректифікації, а також існуючих методів керування параметрами технологічних контурів;
2. Обґрунтувати кіберфізичну структуру та розробити методи роботи функціональної системи;
3. створити програмне забезпечення для реалізації функцій системи підтримки прийняття рішень та керування параметрами процесу;
4. провести експериментальні дослідження ефективності запропонованих методів керування та підтвердити працездатність системи у реальних умовах виробництва.

Реалізація цих завдань дозволить сформувати ефективну систему автоматизованого керування процесом дистиляції-ректифікації, яка забезпечить стабільність технологічних параметрів, підвищить якість спирту та зменшить енерговитрати підприємства.

ВИСНОВОК

1. У розділі було проведено аналіз технологічного процесу дистиляції та ректифікації, а також досліджено принципи роботи основного та допоміжного обладнання. Визначено ключові параметри, що впливають на стабільність та ефективність процесу: температурні режими, рівні робочих середовищ, витрати сировини, тиск і теплові баланси. Окрему увагу приділено обладнанню, його конструктивним особливостям та критичним точкам контролю, які потребують автоматизованого моніторингу.

2. На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність створення кіберфізичної системи керування, здатної забезпечувати безперервний контроль параметрів, раннє виявлення відхилень та автоматичну стабілізацію процесу. Визначено вимоги до майбутньої системи автоматизації та сформовано загальну концепцію її побудови.

3. Отримані результати формують фундамент для розробки структури, алгоритмів і функціональних моделей, що розглядатимуться в наступному розділі.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз функцій і задач кіберфізичної системи

Кіберфізична система керування дистиляційно-ректифікаційною установкою призначена для забезпечення узгодженої роботи всіх технологічних об'єктів – дистилятора, дефлегматорів, колони, конденсатора, насосів і клапанів – шляхом інтеграції фізичного рівня (датчики, виконавчі механізми) з інформаційним (контролер, програмне забезпечення, інтерфейс оператора).

Основними завданнями системи повинно бути:

- безперервний збір даних про температуру, тиск, рівень рідини та стан обладнання;
- автоматичне регулювання параметрів процесу дистиляції й ректифікації;
- захист обладнання від аварійних режимів та перевищення критичних параметрів;
- збереження та аналіз технологічних даних для подальшої оптимізації процесу;

Функціонально кіберфізична система дистиляційно-ректифікаційного комплексу реалізовуватиме замкнений цикл автоматичного керування, який охоплюватиме повний процес – від збору технологічних даних до аналітичної оцінки ефективності роботи.

Основні етапи цього циклу будуть такими:

- Збір інформації. Сигнали від датчиків температури (Т1, Т2) та рівня (П1–П9) надходять до програмованого логічного контролера (ПЛК), де здійснюватиметься первинна перевірка достовірності даних.
- Обробка даних і контроль. ПЛК аналізуватиме отримані показники, порівнюватиме їх із заданими технологічними межами та визначатиме необхідні коригувальні дії для підтримання стабільності процесу.
- Керування технологічним процесом. Через виконавчі механізми – електромагнітні клапани (HV1–HV7), насоси (HP1–HP5) і двигуни (M1, M2) – система регулюватиме подачу пари, охолоджувальної рідини, відведення

фракцій і рівень рідини в апаратах, забезпечуючи оптимальні умови ректифікації.

– Забезпечення безпечного функціонування. У разі виникнення аварійних ситуацій система автоматично блокуватиме подачу пари, зупинятиме насоси та активуватиме контури аварійного охолодження, запобігаючи перегріву або перевищенню тиску.

– Архівація та аналітика даних. Усі параметри процесу зберігатимуться в базі даних, що дозволить здійснювати подальший аналіз, контроль стабільності технологічного режиму та оптимізацію енергоспоживання.

2.2 Обґрунтування функціональної структури

На основі розділу 2.1 було розроблено схему функціональної структури дистиляції-ректифікації спирту (рисунок 2.1). Схема відображає взаємодію між основними підсистемами автоматичного керування, що забезпечуватимуть повний цикл контролю, регулювання та захисту процесу.

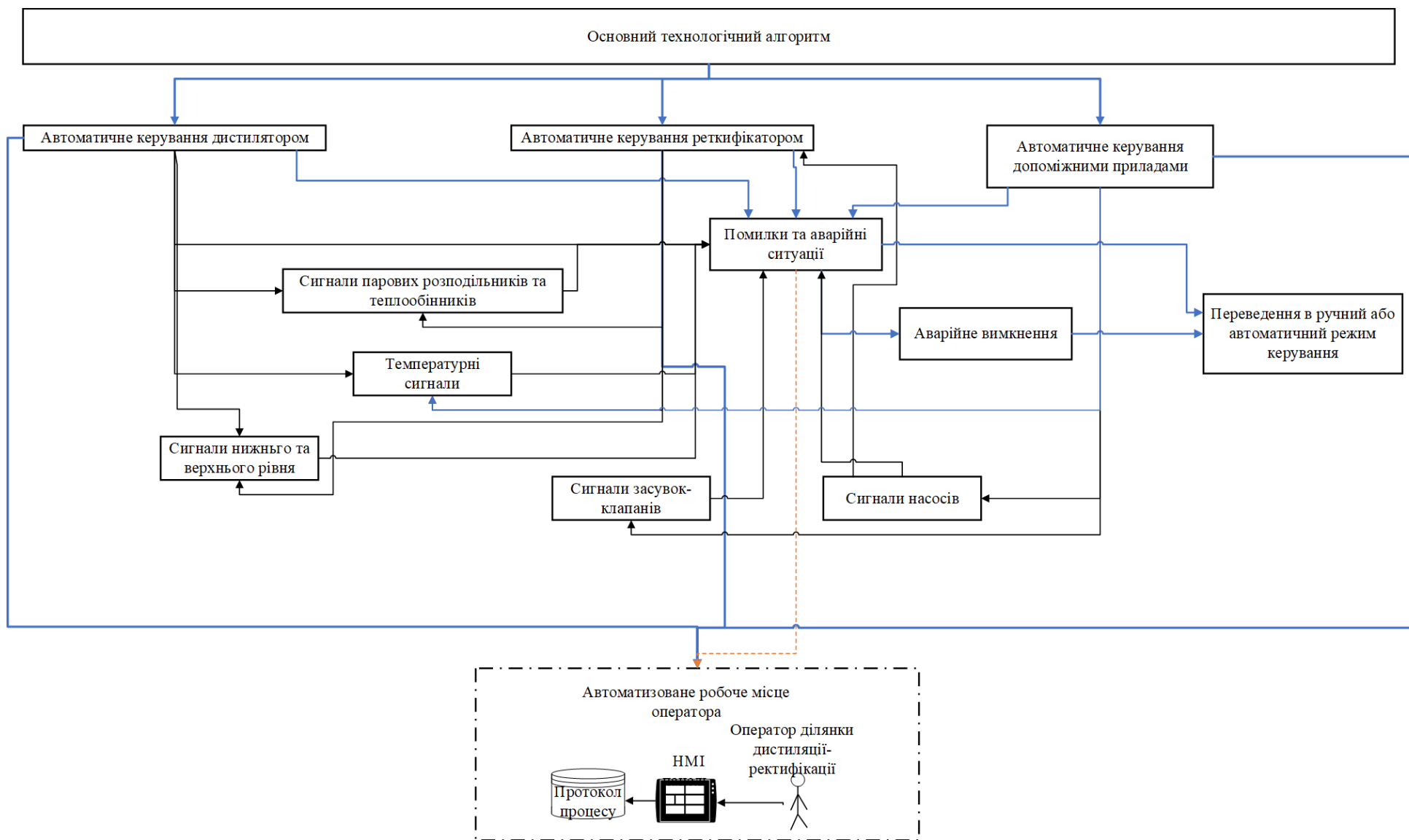


Рисунок 2.1 – Схема функціональної структури дистиляції-ректифікації спирту

До складу системи входять три основні підсистеми:

- Автоматичне керування дистилятором, яке прийматиме сигнали температури, рівнів рідини та стану клапанів для регулювання подачі пари й охолодження.

- Автоматичне керування ректифікатором, що забезпечуватиме стабільність температурного профілю в колоні, розділення фракцій та контроль тиску.

- Автоматичне керування допоміжними приладами, яке координуватиме роботу насосів, теплообмінників, парових розподільників та контурів аварійного охолодження, а також сигналізацію накопичення фракцій і стан ємностей з охолоджувачем, спиртом та кубовим залишком.

Система містить блок обробки сигналів від парових розподільників, теплообмінників, клапанів і насосів, який відповідає за моніторинг їх роботи та передавання інформації до відповідних автоматичних підсистем.

Блок контролю температурних і рівневих сигналів забезпечуватиме безперервний збір і передавання даних із датчиків (T1, T2, P1–P9) для підтримання технологічної стабільності.

Підсистема виявлення помилок та аварійних ситуацій забезпечуватиме фіксацію відхилень, автоматичне відключення обладнання й переведення системи у безпечний режим.

Також передбачено блок переведення в ручний або автоматичний режим керування, який дозволить оператору змінювати режим роботи при виникненні позаштатних ситуацій.

Усі дані передаватимуться на автоматизоване робоче місце оператора (АРМ) через інтерфейс НМІ, де оператор у реальному часі зможе спостерігати за процесом, змінювати параметри, фіксувати події та формувати протоколи.

Таким чином, функціональна структура системи забезпечуватиме повну інтеграцію фізичних процесів дистиляції та ректифікації з цифровими модулями керування, що гарантуватиме точність, безпечність, адаптивність і енергоефективність технологічного процесу.

2.3 Опис функціональної схеми автоматизації дистиляції-ректифікації

На основі попередньо розробленої функціональної структури кіберфізичної системи у цьому розділі представлено функціональну схему автоматизації процесу дистиляції-ректифікації спирту (рисунок 2.2).

Функціональна схема автоматизації дистиляційно-ректифікаційного процесу відображає взаємодію основних підсистем, що забезпечуватимуть автоматичне керування, моніторинг і безпеку технологічного комплексу.

Основними елементами системи є:

– Автоматичне керування дистилятором-ректифікатором та допоміжними приладами – головний вузол, що координуватиме роботу всіх підсистем, обробляючи сигнали датчиків і формуючи керуючі дії для виконавчих механізмів.

– Керування дистилятором-ректифікатором – підтримуватиме оптимальні параметри процесів дистиляції та ректифікації, регулюючи подачу пари, нагрів і охолодження за сигналами температури, рівня та тиску.

– Керування допоміжними приладами – контролюватиме роботу насосів, клапанів і контурів охолодження, забезпечуючи стабільність подачі рідин, холодоагенту та відведення відпрацьованих фракцій.

– Система збору сигналів – отримуватиме дані від датчиків температури (T1, T2), рівня (I1–I9), насосів, засувок і парових розподільників, що дасть змогу підтримувати стабільні технологічні параметри.

– Блок аварійного контролю – здійснюватиме моніторинг помилок, виявлення відхилень і формування команд на аварійне вимкнення, переводячи систему у безпечний або ручний режим.

– Автоматизоване робоче місце (АРМ) – дозволить оператору контролювати процес через НМІ, спостерігати за станом обладнання та вести протоколи технологічних даних.

Перелік умовних позначень:

NA – електропривід. Пристрій, що перетворює електричний сигнал у механічний рух для керування засувками, клапанами чи насосами.

NS – електропривід допоміжного обладнання. Забезпечує запуск або вимкнення насосів, клапанів, вентилів у технологічній схемі.

NSY – електроклапан з датчиком положення. Використовується для автоматичного регулювання подачі середовищ (пари, рідини, теплоносія) з контролем відкриття/закриття.

NAY – електропривід із датчиком положення. Виконавчий механізм, що забезпечує точне позиціонування регулюючих органів та передає інформацію про їх поточний стан у систему керування.

LAN – датчик верхнього рівня. Сигналізує про перевищення допустимого рівня рідини в апараті, що може призвести до переповнення або аварії.

LAL – датчик нижнього рівня аварійно. Фіксує критичне зниження рівня рідини, при якому можливе порушення процесу дистиляції або пошкодження обладнання.

T1-T2 – індикатори температури. Вимірює температуру в дистиляторі та ректифікаційній колоні.

IX1–IX9 – датчики рівня, встановлені в різних ємностях (накопичувачах, колонах, дефлегматорах), що забезпечують безперервний контроль рівня рідини.

HV1X1–HV7Y1 – регулюючі клапани, що керують потоками пари, води або спиртовмісних сумішей у контурі ректифікації.

HP1X1–HP5Y1 – насосні агрегати для перекачування робочих середовищ (сусло, дистилят, охолоджуюча вода, спирт-сирець).

PP1X1–PP2Y1 – парові регулятори подачі пари до дистиляційної й ректифікаційної колон.

2.4 Графічне моделювання автоматизації процесів

На основі побудованої функціональної схеми автоматизації процесу дистиляції-ректифікації (рисунок 2.2), виконано деталізацію роботи системи у вигляді графів автоматизації технологічних процесів.

Графи слугуватимуть логічною основою для подальшої розробки алгоритмів керування у програмованому логічному контролері та дадуть змогу наочно відобразити послідовність дій системи під час виконання технологічних операцій.

Розробка графів автоматизації процесів є логічним продовженням функціональної структури та необхідним етапом для формалізації алгоритмів роботи кіберфізичної системи дистиляційно-ректифікаційної установки. Вони забезпечать візуальне уявлення про логіку керування, узгодження дій усіх підсистем і подальше впровадження системи в реальне виробництво.

1. Граф станів системи автоматизації процесу дистиляції-ректифікації.

На рисунку 2.3, продемонстровано граф станів системи автоматизації процесу дистиляції-ректифікації.

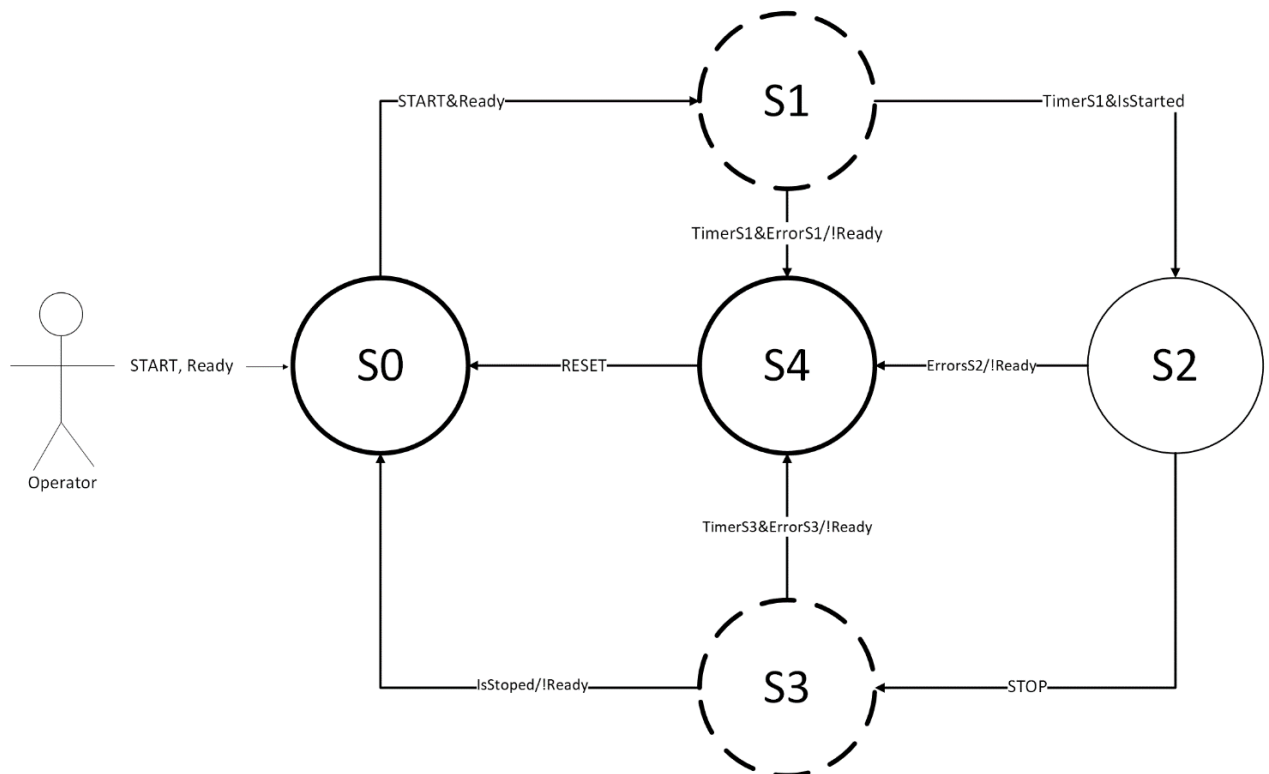


Рисунок 2.3 – Граф станів системи автоматизації процесу

Цей граф відображає загальну логіку роботи кіберфізичної системи автоматизації процесу дистиляції-ректифікації у вигляді станів (S) і переходів між ними. Він демонструє, як система реагує на дії оператора, внутрішні сигнали таймерів, готовність обладнання та помилки під час роботи.

Основні елементи графа:

- S0 – початковий стан (очікування запуску).

У цьому стані система перебуватиме після вмикання або перезапуску. Вона очікуватиме команду START від оператора та перевірятиме готовність усіх вузлів (Ready). Якщо всі компоненти працездатні, система переходить до стану S1.

- S1 – стан запуску системи.

На цьому етапі виконуватиметься ініціалізація процесу, активація основних блоків і підготовка обладнання до роботи. Перехід у S2 здійснюватиметься після завершення таймера TimerS1 або за сигналом про готовність (IsStarted). Якщо буде зафіксовано помилку (ErrorS1) чи відсутність готовності (!Ready), система переходить у аварійний стан S4.

- S2 – робочий стан.

У цьому стані система функціонуватиме у штатному режимі, виконуючи регулювання температур, рівнів і потоків. Якщо виникнуть відхилення або помилки (ErrorsS2 / !Ready), система перейде у S4, а при отриманні команди STOP – у стан S3.

- S3 – стан зупинки-завершення.

Відповідає за контрольований процес вимкнення установки. У цьому режимі робиться зупинка роботи системи, насоси зупиняються, клапани перекриваються, температура поступово знижується до безпечного рівня. Після повного завершення процесу (IsStopped / !Ready) система повертається до S0.

- S4 – аварійний стан.

Активуватиметься при виникненні критичних помилок або несправностей у будь-якому попередньому стані (S1–S3). Система виконуватиме безпечно

вимкнення, фіксацію причини аварії та очікуватиме команду RESET для повернення у S0.

Таким чином, граф демонструє повний цикл функціонування системи: очікування → запуск → робота → зупинка → аварія → повернення до очікування.

2. Граф стану S0 – перевірка готовності системи перед запуском

На основі загального графа роботи кіберфізичної системи (рисунок 2.3), розроблено граф початкового стану S0 (рисунок 2.4).

Цей граф деталізує логіку підготовчого етапу перед початком роботи процесів дистиляції та ректифікації. На даному етапі система виконуватиме перевірку готовності всіх підсистем, обладнання та каналів зв'язку між ними.

Основною метою є забезпечення безпечного старту технологічного процесу та недопущення запуску при наявності помилок чи непідготовлених елементів.



Рисунок 2.4 – Граф початкового стану (S0)

Опис графа:

- S0.0 – базовий початковий стан.

Система переходить у цей стан одразу після вмикання живлення або перезапуску. Вона очікує підтвердження готовності від усіх підсистем: дистилятора, ректифікатора та допоміжних приладів.

- S0.1 – підтвердження готовності.

Перехід у цей стан відбувається, коли всі підсистеми надсилають сигнали готовності (Ready, RectIsReady, DistIsReady та AtherIsReady). Система вважається повністю підготовленою до апуску й переходить у стан S1 (ініціалізація процесу).

- S0.2 – стан неповної готовності.

Якщо оператор намагається розпочати процес, але хоча б один із блоків не готовий (!RectIsReady | !DistIsReady | !AtherIsReady), система переходить у цей стан.

Відображається повідомлення про несправність або неготовність, після чого система повертається до S0.0 для повторної перевірки.

3. Граф стану запуску системи (S1)

Після успішного проходження етапу перевірки готовності (стан S0) система переходить до етапу запуску, який описується графом стану S1 (рисунок 2.5).

Цей граф моделює логіку послідовного запуску основних технологічних підсистем – дистилятора, ректифікатора та допоміжних приладів. Його основна мета полягає в тому, щоб забезпечити поетапне вмикання обладнання з контролем часу, стану виконання й можливих помилок.

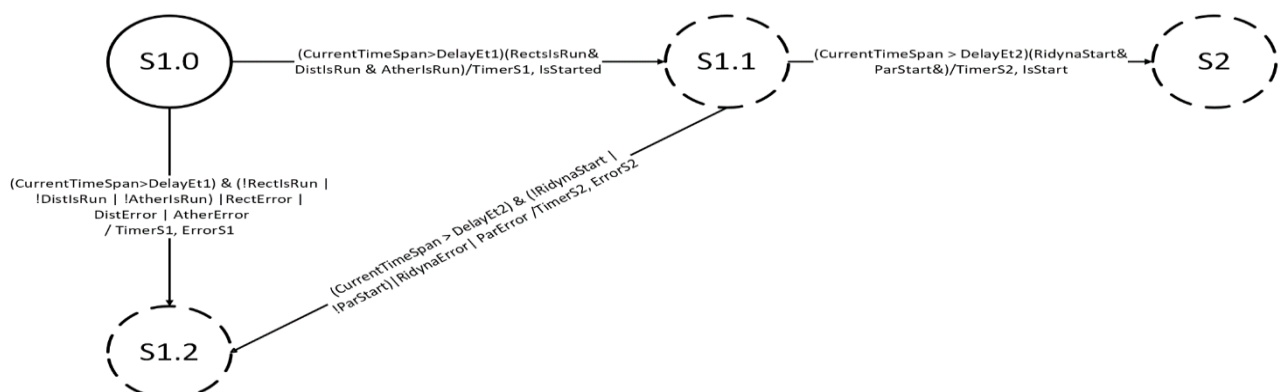


Рисунок 2.5 – Граф стану запуску системи (S1)

Опис графа:

- S1.0 – початковий стан запуску.

Після отримання команди на старт система розпочинає процес увімкнення технологічного обладнання. Відлік часу здійснюється через змінну `CurrentTimeSpan`, яка порівнюється з параметром `DelayEt1` для визначення тривалості підготовчого етапу.

- S1.1 – підтвердження запуску.

Перехід у цей стан відбувається, коли всі підсистеми – дистиляційна (`DistIsRun`), ректифікаційна (`RectIsRun`) і допоміжна (`AtherIsRun`) – функціонують стабільно. Одночасно активується `TimerS1` і встановлюється ознака `IsStarted`, що сигналізує про успішний запуск. Після цього система переходить у S2 (робочий стан).

- S1.2 – помилка запуску.

Якщо під час запуску виявляється, що одна або кілька підсистем не активні (`!RectIsRun | !DistIsRun | !AtherIsRun`) чи виникла помилка (`RectError | DistError | AtherError`), система переходить у цей стан.

У цьому випадку формується сигнал `ErrorS1`, який передається до аварійного стану S4 для подальшої обробки та безпечного вимкнення обладнання.

Реалізація цього етапу гарантує плавний і безпечний перехід системи до робочого режиму (S2), мінімізуючи ризики аварійних ситуацій.

4. Граф робочого стану (S2).

Після завершення етапу запуску (стан S1) система переходить у режим стабільної роботи, який описується графом стану S2, (рисунок 2.6).

Цей граф моделює логіку функціонування кіберфізичної системи в нормальному робочому режимі, коли дистилятор, ректифікатор і допоміжні підсистеми працюють у встановлених межах параметрів.

Основною метою цього етапу є підтримання сталих температурних, рівневих та витратних характеристик із можливістю автоматичної корекції параметрів і переходу до безпечної зупинки у разі команди STOP або аварії.

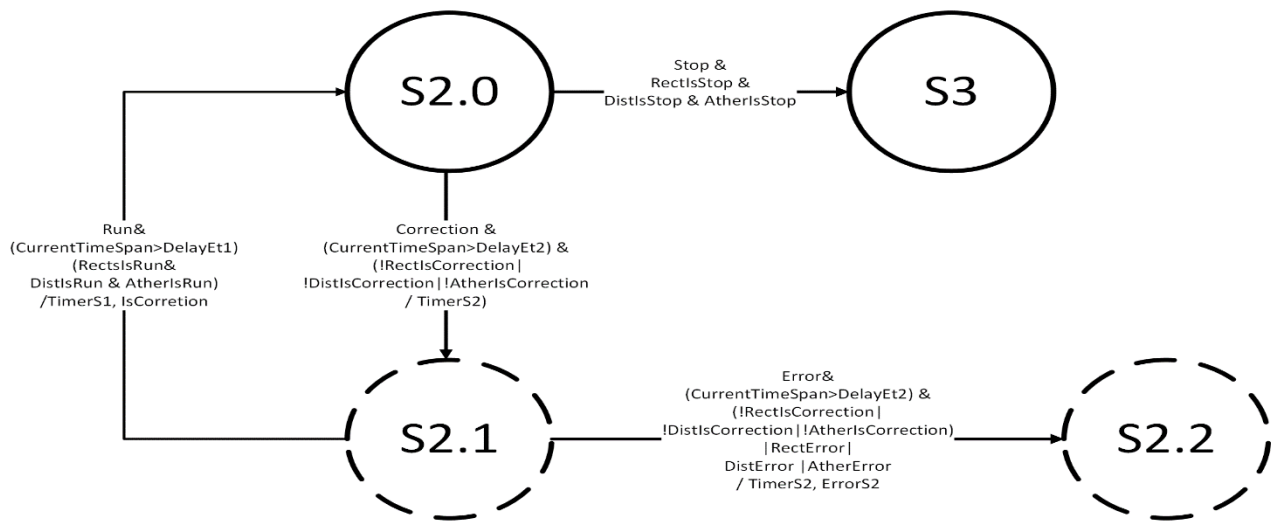


Рисунок 2.6 – Граф робочого стану (S2)

Опис графа:

- S2.0 – робочий стан.

Система працює в нормальному режимі: дистилятор, ректифікатор та допоміжні прилади функціонують стабільно.

Якщо надходить команда Stop йде відповідний сигнал (RectIsStop & DistIsStop & AtherIsStop), система переходить у стан S3 (зупинка).

У випадку появи відхилень (Correction) та після перевищення часу очікування ($CurrentTimeSpan > DelayEt2$) зафіксовано, що одна або кілька підсистем не відповідають нормі (!RectIsCorrection | !DistIsCorrection | !AtherIsCorrection) – активується TimerS2, і система переходить у S2.1 (режим корекції).

- S2.1 – режим корекції параметрів.

На цьому етапі система намагається автоматично стабілізувати технологічні параметри.

Якщо після заданого часу ($CurrentTimeSpan > DelayEt1$) усі підсистеми працюють стабільно (RectIsRun & DistIsRun & AtherIsRun), формується сигнал IsCorreption, і система повертається у S2.0 (робочий стан).

Якщо ж корекція неуспішна (!RectIsCorrection | !DistIsCorrection | !AtherIsCorrection) або з'являються помилки (RectError | DistError | AtherError),

активується TimerS2, формується ErrorS2, і система переходить у S2.2 (стан аварії).

- S2.2 – стан фіксації помилки.

Фіксується несправність у роботі хоча б однієї підсистеми. Після цього система переходить до S4 (аварійного режиму), де здійснюється безпечне вимкнення обладнання.

Таким чином, граф S2 описує повну логіку функціонування системи під час нормальної роботи, включно з автоматичним контролем відхилень, коригуванням параметрів і переходами у безпечні стани.

5. Граф зупинки системи.

Після завершення робочого циклу або отримання команди Stop, система переходить до етапу контрольованого завершення роботи, який описується графом стану S3, (рисунок 2.7).

Цей граф моделює логіку зупинки всіх технологічних підсистем – дистиллятора, ректифікатора та допоміжних приладів, із контролем часу, станів і можливих помилок.

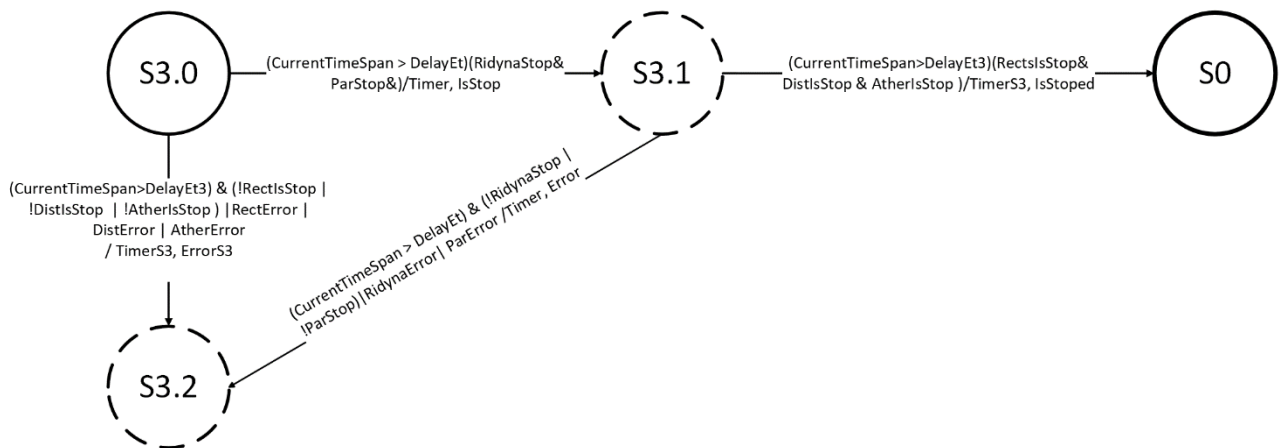


Рисунок 2.7 – Граф зупинки системи (S3)

Опис графа:

- S3.0 – початковий стан зупинки.

Система розпочинає процес послідовного вимкнення технологічного обладнання.

Після перевищення контрольного часу ($\text{CurrentTimeSpan} > \text{DelayEt3}$) виконується перевірка, чи всі підсистеми дійсно зупинилися ($\text{RectIsStop} \& \text{DistIsStop} \& \text{AtherIsStop}$).

У разі успішної зупинки активується TimerS3 , формується сигнал IsStoped , і система переходить у $S3.1$ (завершення зупинки).

- $S3.1$ – завершення зупинки системи.

У цьому стані фіксується завершення всіх процесів. Після повного припинення роботи система переходить у $S0$ (очікування запуску), готова до нового циклу роботи.

- 3.2 – помилка при зупинці.

Якщо під час зупинки хоча б одна підсистема не відреагувала ($\text{CurrentTimeSpan} > \text{DelayEt1}$), ($!\text{RectIsStop} \mid !\text{DistIsStop} \mid !\text{AtherIsStop}$) або виникла помилка ($\text{RectError} \mid \text{DistError} \mid \text{AtherError}$), то система формує сигнал ErrorS3 і активує TimerS3 .

У цьому випадку система переходить у $S4$ (аварійний стан) для безпечного завершення роботи та фіксації причин несправності.

Таким чином, граф $S3$ описує логіку безпечного та контрольованого завершення роботи кіберфізичної системи дистиляції-ректифікації.

Він забезпечує поетапне вимкнення обладнання, контроль станів підсистем і своєчасний перехід до аварійного або очікувального режиму у разі відхилень.

6. Граф Аварійного стану.

Граф стану $S4$, (рисунок 2.8), описує логіку дій системи при виникненні аварійних ситуацій.

Його мета – забезпечити безпечне вимкнення технологічного обладнання, фіксацію помилок, переведення системи в стабільний стан та підготовку до перезапуску після усунення несправностей.

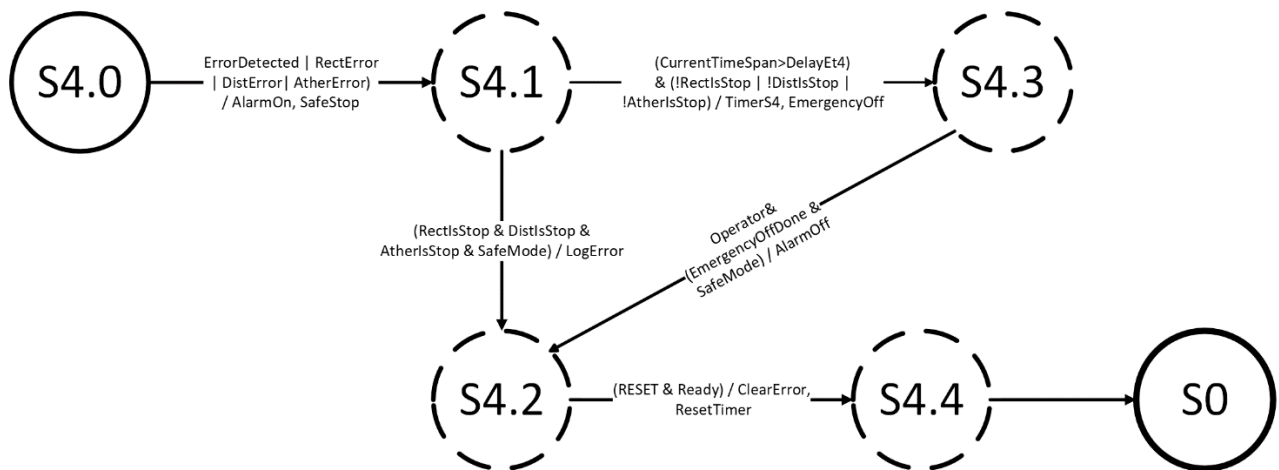


Рисунок 2.8 – Граф аварійного стану (S4)

Опис графа:

- S4.0 – фіксація аварії.

У цей стан система переходить при виникненні критичних помилок. Одразу активується аварійна сигналізація (AlarmOn) та команда SafeStop, яка зупиняє роботу дистилятора, ректифікатора і допоміжних приладів.

Після цього система переходить у стан S4.1.

- S4.1 – процес безпечного вимкнення.

На цьому етапі система контролює фактичну зупинку всіх підсистем. Якщо всі вони зупинилися та активовано безпечний режим (SafeMode), формується запис про аварію (LogError) і система переходить у S4.2.

У разі перевищення часу очікування ($CurrentTimeSpan > DelayEt4$) або неповної зупинки, виконується перехід у S4.3 для екстреного вимкнення (EmergencyOff).

- S4.2 – стан стабілізації та очікування втручання оператора.

Система перебуває в безпечному стані та очікує дій оператора.

Якщо оператор виконує необхідні дії (Operator) і підтверджує завершення екстреного вимкнення (EmergencyOffDone) при активному SafeMode, система вимикає сигналізацію (AlarmOff) і переходить до S4.4.

- S4.3 – екстрене аварійне вимкнення.

Активується, якщо підсистеми не змогли завершити зупинку у встановлений час або одна з них зависла.

Виконується примусове відключення обладнання (EmergencyOff) та фіксація ситуації таймером (TimerS4).

Після завершення аварійного вимкнення система переходить у S4.2 для стабілізації.

- S4.4 – відновлення після аварії.

Після усунення несправності оператор виконує скидання (RESET) за умови готовності системи (Ready).

Виконується очищення помилок (ClearError) та обнулення таймерів (ResetTimer).

Далі система переходить у початковий стан S0, готуючись до нового циклу запуску.

Цей алгоритм забезпечує надійний захист технологічного обладнання та мінімізує ризики пошкодження при непередбачених ситуаціях.

2.5 Графічне моделювання роботи дистиляції-ректифікації спирту

1. Граф описує послідовність автоматизованих операцій у дистиляційно-ректифікаційному циклі спиртового виробництва. Кожен стан відповідає окремому етапу роботи обладнання, а переходи визначаються умовами наявності сигналів від датчиків, станами насосів, клапанів та температурними режимами, продемонстровано (на рисунку 2.9).

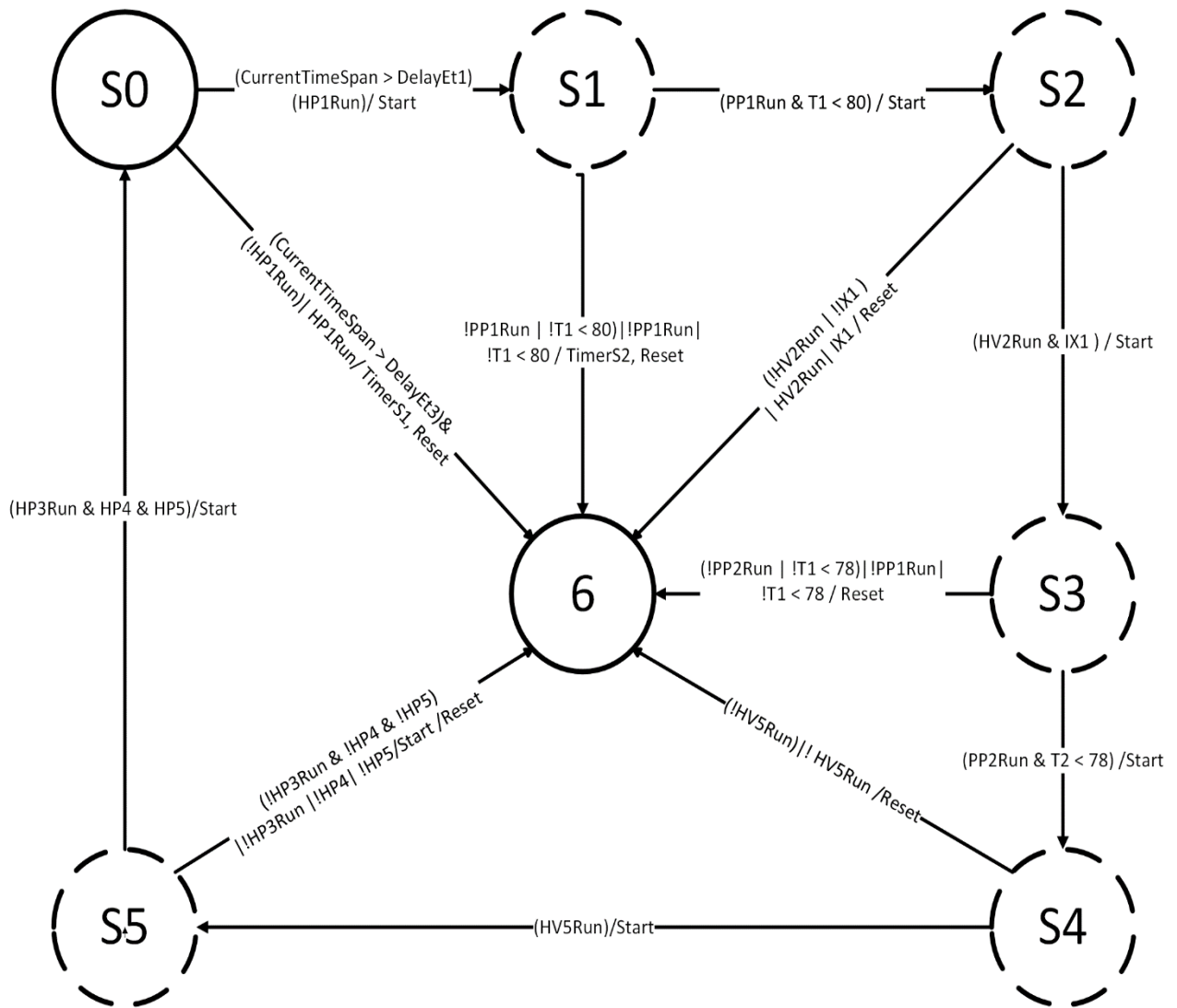


Рисунок 2.9 – Граф дистиляції-ректифікації

Опис графа:

- S0 – Подача суслу до дистиллятора

У цьому стані система здійснює закачування суслу (браги) з бродильного цеху в дистиллятор. Роботу виконує насос HP1, який забезпечує стабільний потік. Перехід до наступного стану відбувається після закінчення затримки та підтвердження, що насос працює (умова HP1Run).

- S1 – Первинний нагрів і початок випаровування

У стані S1 дистиллятор підігріває сусло до температури приблизно 85 °C, достатньої для початку інтенсивного випаровування спиртовмісної фракції.

Після досягнення температури вказаний пороговий сигнал ($T1 < 80$) дозволяє перейти до етапу перекачування парів у дефлегматор та ректифікаційну колону.

- S2 – Подача пари та рідини у ректефікаційну колону

У цьому стані здійснюється переміщення рідини з дистилятора до ректифікаційної колони за умови роботи насоса, відкритого клапана та наявності сигналу верхнього рівня. Додатково контролюється температура, яка має відповідати встановленому порогу. Перехід до наступного етапу виконується тільки після підтвердження заповнення колони.

- S3 – Ректифікація та подача пари

Стан S3 відповідає активному процесу ректифікації. У цей момент паророзподільник PP2 подає пару до ректифікаційної колони, забезпечуючи підтримку температурного профілю, де температура у верхній частині становить 78–80 °С, а в нижній наближається до 98–100 °С. Тут здійснюється розділення фракцій та очищення спиртової пари.

- S4 – Відведення спирту до конденсатора

У стані S4 відкривається засувка-клапан HV5, після чого спиртові пари, пройшовши дефлегматор 2, подаються в конденсатор для охолодження й перетворення у рідкий спирт. На виході формується готовий продукт, що спрямовується на відвантаження або подальше зберігання.

- S5 – Охолодження системи

У цьому режимі запускається циркуляція холодоагента завдяки роботі насосів НР3, НР4 та НР5. Холодна вода подається до конденсатора та дефлегматорів, забезпечуючи стабільне охолодження й конденсацію спиртових парів для підтримання необхідного температурного режиму.

- S6 – Аварійний контроль

Цей стан активується при порушеннях у роботі насосів, відхиленні температури, неправильній роботі клапанів або порушенні послідовності подачі пари й рідини. Він відповідає за безпечну зупинку процесу, фіксацію помилки та скидання аварійних сигналів перед поверненням до нормальної роботи.

2.6 Графічне моделювання роботи насосу

Граф насоса що продемонстровано на (рисунку 2.11), описує алгоритм роботи насоса у вигляді автомата станів, що переходить між п'ятьма станами: S0, S1, S2, S3, S4 та S5. Кожен перехід виконується за певних умов, пов'язаних із часом, сигналами роботи-зупинки насоса та станами помилок.

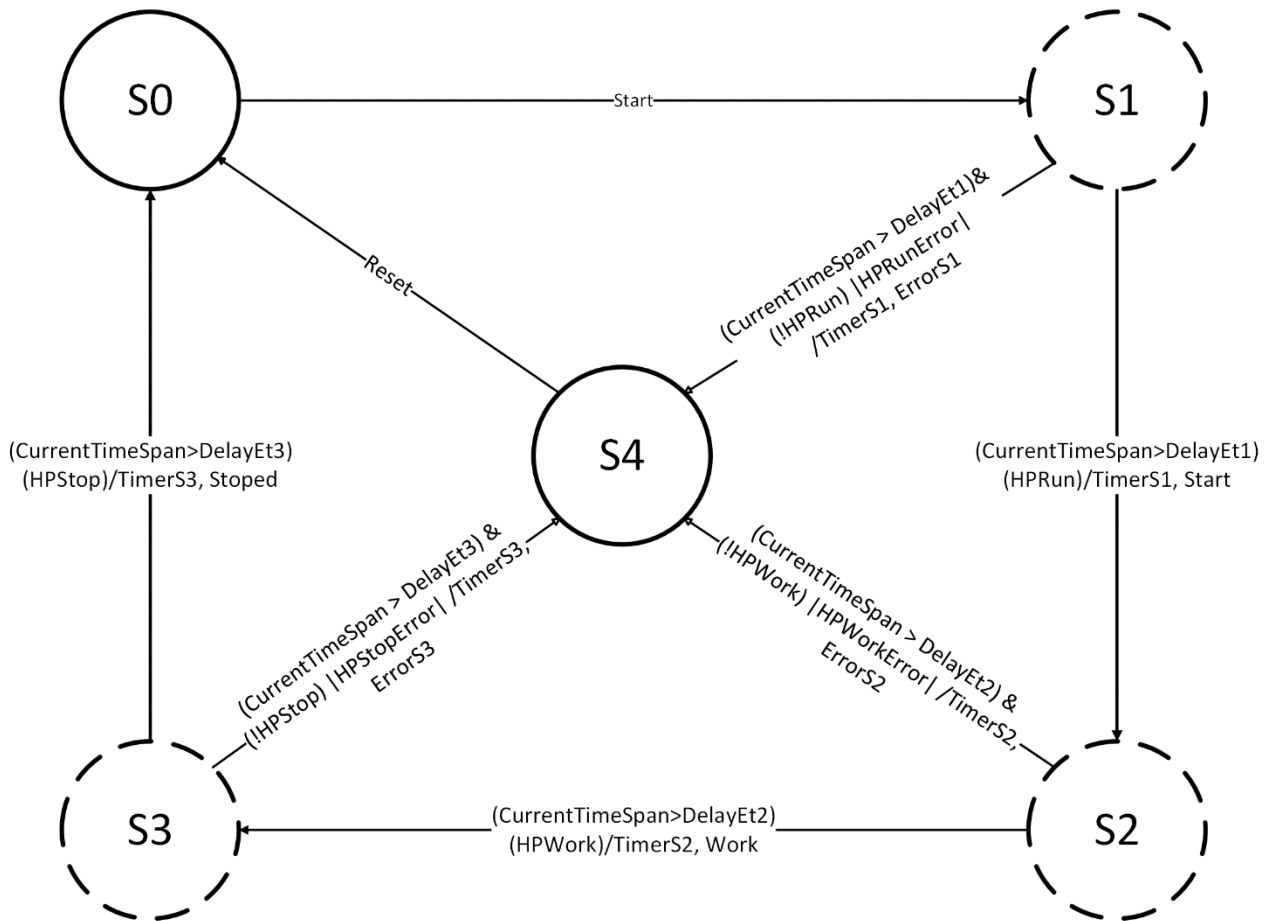


Рисунок 2.11 – Граф насоса

- S0 – Початковий стан

Початковим станом є S0, у якому насос перебуває у стані очікування. Коли система фіксує, що поточний час перевищив затримку DelayEt1 і надходить команда на запуск (HPRun), активується таймер TimerS1, після чого відбувається перехід у стан S1, що відповідає фазі запуску насоса.

- S1 – Стан запуску насоса

У стані S1 контролер очікує появи сигналу HPWork та завершення таймера TimerS1. Якщо умови виконані (тобто насос підтвердив початок роботи), система переходить у стан S2, який означає нормальну роботу насоса. Якщо ж по завершенні затримки сигналу HPWork немає, або виникла помилка запуску (HPRunError), система фіксує ErrorS1 і переходить у стан S4 – аварійний.

- S2 – Стан роботи насоса

Стан S2 описує роботу насоса у стабільному режимі. Після завершення встановленого часу DelayEt2 та надходження команди на зупинку (HPStop), запускається таймер TimerS2, і відбувається перехід до стану S3 – фази зупинки. Якщо ж сигнал HPWork зникає передчасно або реєструється HPWorkError, система генерує ErrorS2 і переходить в аварійний стан S4.

- S3 – Стан зупинки насоса

У стані S3 контролюється коректність зупинки. Якщо після спливу часу DelayEt3 насос не подає підтвердження зупинки (!HPStop), або виникає HPStopError, система фіксує ErrorS3 і переводить насос у аварійний S4. Якщо ж зупинка проходить коректно, цикл повертається у початковий стан S0.

- S4 – Аварійний стан

Стан S4 є аварійним режимом. У ньому насос зупинений, а система очікує команди Reset, після якої повертається до S0. Перехід до S4 можливий із будь-якого проміжного стану при виявленні помилки запуску, роботи або зупинки.

Наступні графи такі як: граф засувка-клапан та граф паророзподільник мають схожу структуру.

ВИСНОВОК

1. У другому розділі було сформовано повну структурну основу кіберфізичної системи дистиляційно-ректифікаційного процесу. На базі аналізу технологічних операцій розроблено функціональну структуру системи керування та визначено взаємозв'язки між її основними підсистемами. Показано, що процеси дистиляції та ректифікації, незважаючи на різні фізико-технологічні принципи роботи, мають спільну логіку автоматизації та можуть бути об'єднані в єдиний контур керування.

2. На основі функціональної схеми побудовано формалізовані графи станів, які описують роботу установки на всіх етапах: початковий стан, запуск, робочий режим, корекцію параметрів, аварійне реагування та контрольовану зупинку. Таке графічне представлення дозволило структурувати алгоритми керування, визначити критичні переходи між станами та передбачити умови переходів у аварійні режими.

3. Сформована модель є базою для подальшої розробки програмних алгоритмів та створює передумови для побудови надійної, безпечної й енергоефективної кіберфізичної системи управління дистиляційно-ректифікаційним комплексом.

3 СИНТЕЗ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Розробка функціональної схеми автоматизації системи

Розміщення обладнання кіберфізичної системи дільниці дистиляції-ректифікації повинно здійснюватися безпосередньо біля технологічних вузлів, що контролюються, на відстані не більше 2 м. Монтаж допускається в опалюваних виробничих приміщеннях із температурним режимом 5...40 °С і площею до 9 м². Самі ж вимірювальні зони та контрольні точки можуть розташовуватися як у теплому, так і в холодному середовищі або навіть під захисним навісом. Ці умови визначають вимоги до комплекту обладнання та структури КФС, що формують особливості її функціональної автоматизації.

1. Для побудови такої кіберфізичної системи доцільно застосовувати промислові засоби автоматизації: контролер, модулі збору даних від технологічних датчиків (температури, тиску, рівня, витрати) та операторську панель НМІ. Використання цього обладнання гарантує стабільне функціонування системи в режимі реального часу, що критично для процесів дистиляції та ректифікації.

2. З огляду на наявність НМІ-панелі доцільно саме на ній розміщувати рецептурні карти технологічних режимів, а також оперативну базу параметрів, що надходять від датчиків колони. Це зменшує навантаження на контролер і виключає потребу його взаємодії з підсистемами, що не працюють у реальному часі.

3. Оскільки оперативні технологічні дані зберігаються на НМІ, необхідно забезпечити Ethernet-зв'язок панелі з центральною системою керування виробництвом спирту. Це також потребує використання мережевого шлюзу для переходу між різними підмережами автоматизованої лінії.

4. Оскільки рішення про перехід колони між режимами (наприклад, перехід від дистиляції до ректифікації) приймається безпосередньо оператором технологічної дільниці, система повинна надавати йому можливість оперативного керування КФС з місця.

5. Через обмежений простір для встановлення обладнання та використання центрального промислового контролера немає потреби застосовувати додаткові окремі контролери для вузьких підсистем. Вимірювальні датчики (температурні, тискові, рівнеміри та ін.) доцільно підключати безпосередньо до центрального контролера КФС через відповідні узгоджувальні модулі.

У результаті, функціональна схема автоматизації дистиляційно-ректифікаційної ділянки формується у вигляді, показаному (на рисунку 2.2).

Представлена схема, а також технічні вимоги й аналіз особливостей перебігу процесів дистиляції, ректифікації дозволяють розробити принципову схему кіберфізичної системи цієї ділянки виробництва спирту.

3.2 Розробка принципової схеми комплексу технічних засобів

3.2.1 Аналіз входів та виходів системи

Для обґрунтування складу технічних засобів кіберфізичної системи ділянки дистиляції-ректифікації необхідно виконати аналіз та класифікацію усіх вхідних сигналів від датчиків і вихідних керуючих каналів.

На основі аналізу функціональної схеми (на рисунку 2.2), а також технічних засобів, розглянутих у розділах 1 і 2, сформовано класифікацію сигналів, подану відповідно до таблиці 3.1.

Замовником визначено вимогу щодо використання контролерів серії Siemens SIMATIC S7-1200 як основи для реалізації кіберфізичної системи [22]. Це зумовлює низку особливостей у виборі комплексу технічних засобів:

- Контролери серії S7-1200 мають вбудовані дискретні входи та виходи, що дозволяє відмовитися від зовнішніх модулів дискретних сигналів.
- Деякі модифікації контролерів оснащені власним 24В джерелом живлення датчиків, тому доцільно використати його для живлення НМІ-панелі та органів керування.
- Наявність інтегрованого інтерфейсу Profinet дає можливість обирати операторську панель НМІ з таким самим інтерфейсом для прямої комунікації в мережі промислового Ethernet.

Таблиця 3.1 – Перелік вхідних та вихідних сигналів КФС

№ п/п.	Найменування інформації	Ідентифікатор	Напр. вх./вих.	Функція	Вигляд	Джерело/ Отримувач	Форма подання (розрядність, точність)		Період вв./вив., сек.
							Зовнішня	Внутрішня	
Дистилятор									
1.	Верхній рівень (LАН)	IX1	Вхід.	Контр.	Норм. замкн.	Датчик рівня	24 В	1 біт	0,4
2.	Нижній рівень (LAL)	IX2	Вхід.	Контр.	Норм. замкн.	Датчик рівня	24 В	1 біт	0,4
3.	Температура сусла (ТІ)	T1	Вхід.	Вимір.	Аналог.	Тер. опору	РТ-100	13 біт	0,5
Ректифікатор									
4.	Верхній рівень (LАН)	IX4	Вхід.	Контр.	Норм. замкн.	Датчик рівня ПДУ-1.1	24 В	1 біт	0,4
5.	Нижній рівень (LAL)	IX5	Вхід.	Контр.	Норм. замкн.	Датчик рівня	24 В	1 біт	0,4
6.	Температура сусла (ТІ)	T2	Вхід.	Вимір.	Аналог.	Тер. опору	РТ-100	13 біт	0,5
Збірник кубового залишку									
7.	Верхній рівень (LАН)	IX3	Вхід.	Контр.	Норм. Замкн.	Датчик рівня	24 В	1 біт	0,4

Продовження таблиці 3.1

№ п/п.	Найменування інформації	Ідентифікатор	Напр. вх./вих.	Функція	Вигляд	Джерело/ Отримувач	Форма подання (розрядність, точність)		Період вв./вив., сек.
							Зовнішня	Внутрішня	
Накопичувач головної та хвостової фракції									
8.	Верхній рівень (LAN)	IX6	Вхід.	Контр.	Норм. замкн.	Датчик рівня	24 В	1 біт	0,4
9.	Нижній рівень (LAL)	IX7	Вхід.	Контр.	Норм. замкн.	Датчик рівня	24 В	1 біт	0,4
Холодогент (вода харчової якості)									
10.	Нижній рівень (LAL)	IX8	Вхід.	Контр.	Норм. замкн.	Датчик рівня	24 В	1 біт	0,4
Ємність спирту на відвантаження									
11.	Нижній рівень (LAL)	IX9	Вхід.	Контр.	Норм. замкн.	Датчик рівня	24 В	1 біт	0,4
Насоси (HP1-HP5)									
12.	Включено (NS)	HP1Y1-HP5Y1	Вхід.	Контр.	Норм. розімкн.	Контактор	24 В	1 біт	0,5

Продовження таблиці 3.1

№ п/п.	Найменування інформації	Ідентифікатор	Напр. вх./вих.	Функція	Вигляд	Джерело/ Отримувач	Форма подання (розрядність, точність)		Період вв./вив., сек.
							Зовнішня	Внутрішня	
Насоси (HP1-HP5)									
13.	Включити (NA)	HP1X1-HP5X1	Вихід.	Керув.	Норм. розімкн.	Контактор	~ 230 В	1 біт	0,5
Засувки-клапани (HV1-HV7)									
14.	Клапан відкритий (NSY)	HV1Y1- HV7Y1	Вхід	Конт.	Норм. відкритий	Індуктивний датчик	24 В	1 біт	0,5
15.	Клапан закритий (NAY)	HV1X1- HV7X1	Вхід	Кер.	Норм. відкритий	Індуктивний датчик	24 В	1 біт	0,5
Паровий розподільник (PP1-PP2)									
16.	Включити керування насосом подачі пари (NS)	PP1Y1-PP2Y1	Вхід	Конт.	Цифровий	ПЧ	Modbus RTU	13 біт	Виз. швид. каналу 9600
17.	Керування насосом подачі пари (NA)	PP1X1-PP2X1	Вихід	Кер.	Цифровий	ПЧ	Modbus RTU	13 біт	Виз. швид. каналу 9600

Для подальшого вибору апаратних засобів КФС проводиться класифікація цих сигналів за їх технічними характеристиками. Узагальнені результати наведені відповідно до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Зведена таблиця входів та виходів КФС дистиляції-ректифікації спирту

№ п/п	Пристрій	Опис входу або виходу	Кількість входів або виходів
Дискретні входи			
1.	Дистилятор	Датчик рівня	2
2.	Ректифікатор	--/–	2
3.	Збірник кубового залишку	--/–	1
4.	Накоп. голов. та хвост фрак.	--/–	2
5.	Холодогент	--/–	1
6.	Ємність спирту на відвант.	--/–	1
7.	Насос (НР1-НР5)	Контактор Siemens 3RT2	5
8.	Засувка-клапан (НВ1-НВ7)	Індуктивний датчик	7
9.	Паровий розподільник (РР1-РР2)	ПЧ	2
РАЗОМ			23
Аналогові входи			
10.	Дистилятор	Термометр опору РТ-100	1
11.	Ректифікатор	--/–	1
РАЗОМ			2
Дискретні виходи			
12.	Насос (НР1-НР5)	Контактор Siemens 3RT2	5
13.	Засувка-клапан (НВ1-НВ7)	Індуктивний датчик	7
14.	Паровий розподільник (РР1-РР2)	ПЧ	2
РАЗОМ			14

– контролери не оснащені вбудованими входами для підключення тензодатчиків, однак для цього передбачені спеціалізовані модулі розширення;

– контролери не мають інтегрованого інтерфейсу RS-485 для роботи в мережі Modbus RTU, проте можливість підключення забезпечується через додаткові комунікаційні модулі.

Додатковими умовами від замовника є використання операторської панелі HMI серії Comfort з діагоналлю не менше 9 дюймів, а також мережевих пристроїв Siemens – комутатора, контролера та маршрутизатора.

3.2.2 Обґрунтування елементної бази системи

Для забезпечення коректної роботи кіберфізичної системи дистиляції-ректифікації, а також відповідності проєкту технічним та експлуатаційним вимогам, необхідно врахувати низку додаткових умов, визначених замовником. Ці умови безпосередньо впливають на вибір апаратних засобів, конфігурацію системи автоматизації та побудову мережевої інфраструктури.

Операторська панель SIMATIC KTP900 використовується в кіберфізичній системі дистиляції-ректифікації для візуалізації параметрів та керування технологічним обладнанням. Панель забезпечує введення команд оператором, відображення режимів роботи та контроль стану системи через мережу PROFINET [23].

Даний прилад та технічні характеристики продемонстровано (на рисунку 3.1) та відповідно до таблиці 3.3.



Рисунок 3.1 – Панель оператора KTP900

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики НМІ-панелі КТР900

№	Найменування параметру	Значення
1.	Діагональ екрану	9" TFT
2.	Роздільна здатність	800 × 480 пікселів
3.	Тип введення	Сенсор + 8 функціональних клавіш
4.	Живлення	24 В DC
5.	Споживання струму	625 мА
6.	Інтерфейси	1× PROFINET, 1× USB
7.	Пам'ять користувача	10 МБ

Контролер Siemens S7-1200 CPU 1215C використовується як центральний елемент керування кіберфізичною системою. Він забезпечує приймання сигналів від датчиків та керування виконавчими механізмами процесу дистиляції-ректифікації [22]. На (рисунку 3.2), наведено зовнішній вигляд контролера, а відповідно до таблиці 3.4, продемонстровано технічні характеристики.



Рисунок 3.2 – Контролер Siemens S7-1200 CPU 1215C

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики контролера CPU 1215C

№	Найменування параметру	Значення
1.	Дискретні входи (DI)	14 шт., 24 В DC
2.	Дискретні виходи (DO)	10 шт., транзисторні, 24 В DC

Продовження таблиці 3.4

№	Найменування параметру	Значення
3.	Аналогові входи (AI)	2 шт., 0–10 В
4.	Аналогові виходи (AO)	2 шт., 0–20 мА / 0–10 В
5.	Живлення	24 В DC
6.	Пам'ять програм/даних	100 КБ / 50 КБ

Модуль SIMATIC SM 1223 8DI/8DO використовується для розширення кількості дискретних сигналів у системі керування дистиляційно-ректифікаційної ділянки. Забезпечує 8 дискретних входів та 8 релейних виходів для підключення датчиків і виконавчих механізмів [24]. Технічні характеристики модуля можна побачити відповідно до таблиці 3.5, а зовнішній вигляд модуля продемонстровано на (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Модуль дискретного вводу-виводу SIMATIC SM 1223 8DI/8DO

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики модуля дискретного вводу-виведення

№	Найменування параметру	Значення
1.	Дискретні входи (DI)	16 шт., 24 В DC
2.	Дискретні виходи (DO)	16 шт., релейні, 2 А
3.	Тип входів	Sink/Source

Продовження таблиці 3.5

4.	Живлення	24 В DC
5.	Загальне споживання струму	80 мА
6.	Ступінь захисту	IP20

Модуль SIMATIC SM 1231, 4 AI (використовується в КФС дистиляційно-ректифікаційної ділянки для підключення аналогових датчиків (температури, тиску, рівня тощо). Має 4 аналогових входи з підтримкою різних діапазонів (наприклад, ± 10 В, 0–20 мА) і високою роздільною здатністю [25]. Технічні характеристики модуля можна побачити відповідно до таблиці 3.6, а зовнішній вигляд модуля продемонстровано на (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Модуль аналогового введення SIMATIC SM 1231, 4 AI

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики модуля аналогового введення

№	Найменування параметру	Значення
1.	Кількість аналогових входів (AI)	4 шт.
2.	Діапазони сигналів	± 10 В / 0–20 мА
3.	Роздільна здатність	15 біт + знак
4.	Живлення	24 В DC
5.	Споживання	67 мА

Комунікаційний модуль SIMATIC S7-1200, CM 1241, RS422/485 використовується для організації послідовного зв'язку між контролером та зовнішніми пристроями за стандартом RS-485 [26]. Технічні характеристики модуля можна побачити відповідно до таблиці 3.7, а зовнішній вигляд модуля продемонстровано на (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Комунікаційний модуль CM 1241, RS422/485

Таблиця 3.7 – Технічні характеристики комунікаційної плати RS485

№	Найменування параметру	Значення
1.	Інтерфейс	1 × RS-422 / RS-485
2.	Протоколи	Freeport, Modbus RTU
3.	Живлення	24 В DC
4.	Струм споживання	220 мА

Маршрутизатор-безпека SCALANCE SC632-2C призначений для захисту мереж автоматизації. Підтримує NAT / NAT, інтегрований файрвол, VPN з'єднання через SINEMA Remote Connect, і має 2 комбінованих порти (RJ45 / SFP) [27]. Технічні параметри продемонстровано відповідно до таблиці 3.7, зовнішній вид на (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Маршрутизатор SCALANCE SC632-2C

Таблиця 3.8 – Технічні характеристики маршрутизатора

№	Найменування параметру	Значення
1.	Ethernet-порти	2 × combo-порт
2.	WAN / Uplink	1 × RJ-45
3.	Максимальна пропускна здатність	10 / 100 / 1000 Мбіт/с
4.	Функції безпеки	Файрвол, NAT / NAPT
5.	VPN	Підтримка IPsec (до 10 тунелів)
6.	Живлення	24 В DC
7.	Ступінь захисту	IP20

Вирахуємо споживання струму всіх приладів окрім контролера Siemens S7-1200 CPU 1215C так як у нього є власний блок живлення.

Споживання струму модулів вийде: 625 мА (КТР900) + 80 мА (SM 1223) + 67 мА (SM 1231) + 220 мА (SM 1241, RS422/485) + 360 мА (SC632-2C) = 1352 мА.

Загальне споживання входів і виходів:

- 23 дискретний вхід (DI) = $23 \times 3 \text{ мА} = 69 \text{ мА}$;
- 2 аналогових входів (AI) = $2 \times 0,5 \text{ мА} = 1 \text{ мА}$;
- 14 дискретних виходів (DO) = $14 \times 20 \text{ мА} = 280 \text{ мА}$.

Після виконання розрахунків встановлено, що сумарне споживання струму всіма входами та виходами становить: 69 мА для дискретних входів, 1 мА для

аналогових входів та 280 мА для дискретних виходів, що разом дорівнює 164 мА. Якщо додати споживання всіх підключених модулів, отримаємо загальне навантаження приблизно 1702 мА.

З огляду на отримані значення, для стабільної роботи системи необхідний блок живлення з вихідним струмом не менше 2 А при напрузі 24 В, що забезпечить достатній запас за потужністю та надійну роботу всієї системи.

Для забезпечення стабільної та безперебійної роботи було обрано блок живлення SIMATIC PM1207. Він має оптимальні параметри для промислових умов, гарантує надійне живлення 24 В та сумісний із всією лінійкою обладнання Siemens.

Саме тому цей блок живлення є найбільш доцільним рішенням для застосування в даній системі автоматизації [28]. Технічні параметри продемонстровано відповідно до у таблиці 3.7, та зовнішній вид (на рисунку 3.7).



Рисунок 3.7 – Блок живлення серії SIMATIC S7-1200, PM1207

Таблиця 3.9 – Технічні характеристики блоку живлення

№	Найменування параметру	Значення
1.	Вхідна напруга	~120 / 230 В AC
2.	Частота мережі	60 Гц
3.	Вихідна напруга	24 В DC
4.	Максимальний вихідний струм	2,5 А
5.	Час резервування при вимкненні мережі	≥ 20 мс

Продовження таблиці 3.9

6.	Режим захисту	Захист від короткого замикання, перевантажень
7.	Монтаж	DIN-рейка

На основі обраної та обґрунтованої елементної бази можливо сформувавши принципову схему комплексу технічних засобів кіберфізичної системи.

3.2.3 Реалізація принципової схеми кіберфізичної системи

На основі опису входів та виходів системи, було реалізовано принципову схему КФС ДР, (рисунок 3.8).

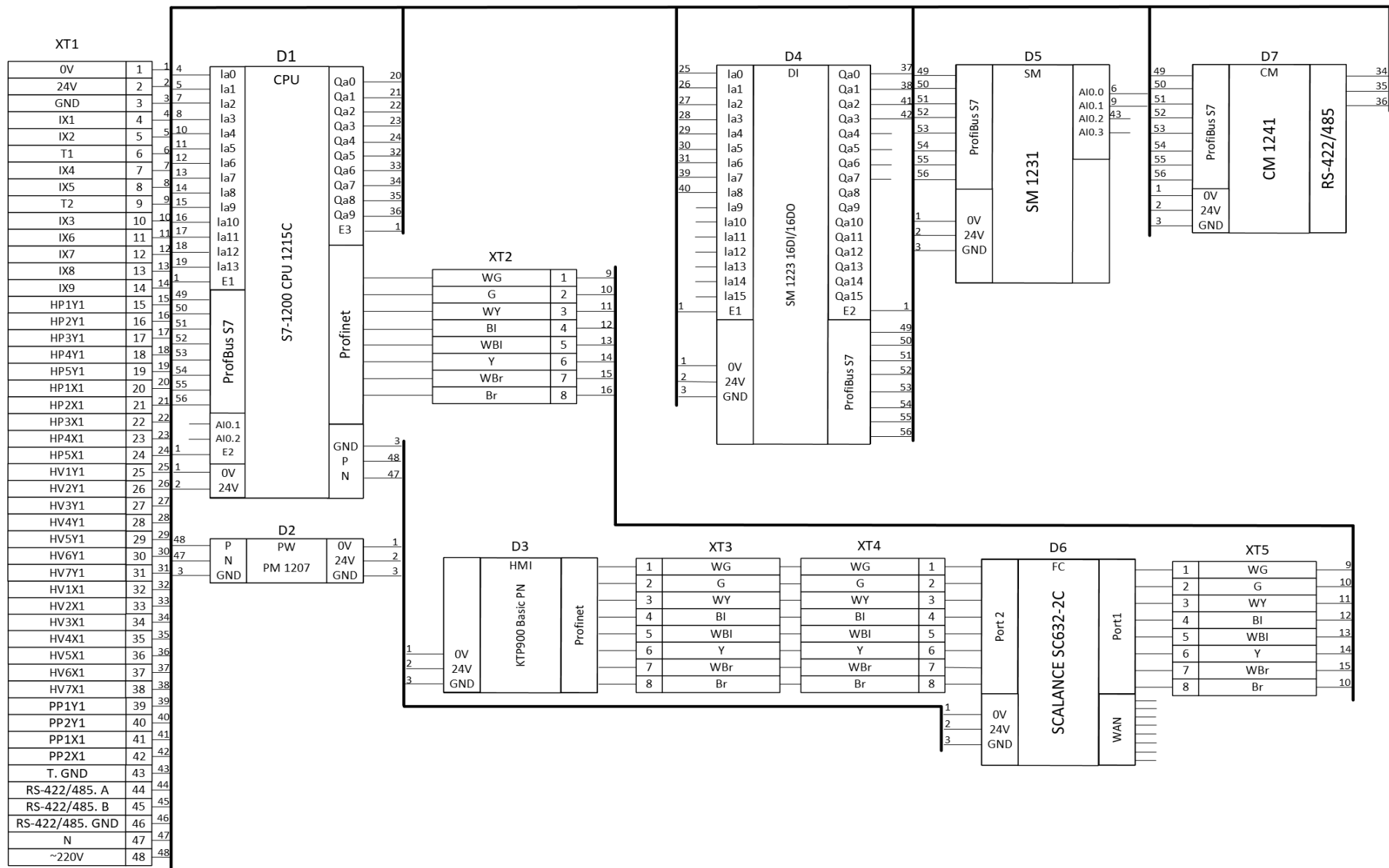


Рисунок 3.8 – Принципова схема КФС ДР

ВИСНОВОК

1. У результаті синтезу кіберфізичної системи дистиляційно-ректифікаційної ділянки визначено її функціональну структуру, склад апаратних компонентів та принципи взаємодії між технологічними вузлами. На основі вимог технологічного процесу виконано обґрунтований вибір контролера, модулів вводу-виводу, операторської панелі, мережевого обладнання й пристроїв живлення. Побудована принципова схема відображає інформаційні та енергетичні зв'язки між елементами системи та забезпечує можливість реалізації необхідних режимів автоматичного керування.

2. Проведена класифікація сигналів, визначення їх параметрів та оцінка сумарного споживання струму дозволили підтвердити відповідність підібраних технічних засобів умовам експлуатації та вимогам технологічного процесу. Сформований комплекс обладнання забезпечує достатню надійність, масштабованість, інтеграцію з мережевою інфраструктурою та підтримку алгоритмів автоматизованого керування.

4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Призначення та сфера застосування програмного забезпечення

Програмне забезпечення призначене для роботи у складі кіберфізичної системи дистиляційно-ректифікаційної ділянки та забезпечує автоматизоване керування процесами дистиляції, ректифікації, подачею сусли, охолодженням і відбором фракцій.

Основні функції ПЗ включають збір і обробку сигналів від датчиків, формування керуючих команд для насосів, клапанів та іншого обладнання, підтримання стабільних технологічних параметрів, контроль аварійних ситуацій і передачу інформації на панель оператора НМІ.

ПЗ працює у режимі реального часу, забезпечує автоматичний цикл опитування датчиків та виконання алгоритмів керування. Запуск і зупинка системи можуть здійснюватися як з панелі оператора, так і з інших контролерів або АСУ вищого рівня [29].

4.2 Обґрунтування технічних характеристик програми

Програмне забезпечення кіберфізичної системи дистиляційно-ректифікаційної ділянки повинно забезпечувати повний цикл автоматизованого контролю та керування технологічними процесами у режимі реального часу. Основна мета роботи програми — формування коректних керуючих впливів на апаратурні засоби, обробка сигналів від датчиків та підтримання стабільності технологічних параметрів [29].

4.2.1 Основні функції програми

Програмне забезпечення, що виконується в контролері Siemens S7-1215, повинно забезпечувати такі функціональні можливості:

- прийом сигналів від датчиків температури, рівня та положення клапанів;
- фільтрація та обробка дискретних і аналогових сигналів із захистом від перешкод та "брязкоту" контактів;

- контроль стану насосів, виконавчих клапанів, паророзподільників та іншого обладнання;
- розрахунок технологічних затримок (час прогріву, стабілізації, наповнення та спорожнення вузлів);
- реалізація алгоритмів безпечної зупинки процесу при появі аварійних станів;
- передача технологічної інформації на систему верхнього рівня (SCADA/HMI) та прийом команд для ручного або автоматичного режиму [29].

4.2.2 Технічні вимоги до роботи програми

- Програма працює на основі мови LAD у середовищі TIA Portal, що дозволяє уникати зациклювання алгоритмів і забезпечує високу надійність виконання.
- Обробка вихідних команд на приводи, насоси, клапани виконується поза основним сканом, що забезпечує захист каналів введення-виведення від випадкових імпульсів.
- Ініціалізація системи здійснюється автоматично під час подачі живлення; первинні умови завантажуються з конфігураційних параметрів.
- Розрахункова довжина програми (до 120 логічних команд) забезпечує час циклу не більше ніж 10–15 мс, що гарантовано задовольняє вимоги до реального часу процесу дистиляції [29].

4.2.3 Вхідні дані програми

Програма контролера повинна обробляти:

- сигнали датчиків рівня, температури, витрати;
- сигнали стану клапанів, насосів та паророзподільників;
- команди від оператора або (режим роботи, запуск, зупинка, аварійні команди);
- інформацію про стан аварійних і захисних датчиків [29].

4.2.4 Вихідні дані програми

Програма повинна генерувати такі керуючі та інформаційні сигнали:

- команди на відкриття/закриття електроклапанів;
- включення/виключення насосного обладнання;
- передача інформації на панель оператора про параметри процесу (температура, рівень, кількість циклів, аварійні стани);
- сигнали блокувань і аварійних відключень для забезпечення безпечного функціонування [29].

4.2.5 Технічні засоби та середовище розробки

Для розроблення програмного забезпечення кіберфізичної системи використовуються такі технічні та програмні засоби:

- контролер Siemens S7-1215 як основний обчислювальний модуль;
- середовище програмування TIA Portal V14+;
- мова розробки – LAD;
- передача даних через Ethernet для інтеграції з SCADA або HMI-панеллю;

4.3 Опис розробленої програми

4.3.1 Загальні відомості

Розроблене програмне забезпечення реалізоване у середовищі Siemens TIA Portal V14 у складі проекту керування кіберфізичною системою дистиляційно-ректифікаційної ділянки. Програма завантажується у контролер Siemens S7-1215, де зберігається у незалежній пам'яті й автоматично виконується після подачі живлення.

Логіка роботи реалізована мовою LAD, що забезпечує надійність, наочність та простоту обслуговування. Для виконання програми використовується вбудований інтерпретатор контролера S7-1215, додаткове програмне забезпечення під час експлуатації не потрібне. Завантаження чи оновлення програми можливе через Ethernet у середовищі TIA Portal [29].

4.3.2 Функціональне призначення

Програма забезпечує автоматизоване керування технологічним обладнанням дистиляційно-ректифікаційної ділянки, формує керуючі сигнали на виконавчі механізми та здійснює прийом даних від давачів у реальному часі.

Алгоритм роботи підтримує стабільність технологічних режимів, контролює критичні параметри, виконує функції захисту та аварійного блокування обладнання відповідно до вимог КФС.

Програма також передає необхідні дані на контролер вищого рівня або НМІ-панель та працює у складі системи незалежно від каналу зв'язку з верхнім рівнем керування [29].

4.3.3 Опис логічної структури програми

Дана програма розміщена в оперативній пам'яті програми користувача контролера S7-1215C який створений з організаційношо блоку Main, таблиці тегів La/Qa CPU, та різних функцій.

В блоці Main реалізований процес дистиляції-ректифікації спирту. Також реалізовані такі графи як:

- Graf_Dest_Rect1;
- Graf_Nasos;
- Graf_ParRozpod1;
- Graf_ParRozpod2;
- Graf_Zasuvca-Clapan;

Реалізовано команди запуску, помилки, перезавантаження та зупинки.

4.3.4 Використані технічні засоби

Для коректної роботи програми потрібно:

- модуль контролера S7-1215C – 1 шт.;
- модуль дискретного вводу-виводу SM 1223 8DI/8DO – 1 шт.;
- модуль аналогового введення SM 1231, 4 AI – 1 шт.;
- комунікаційний модуль SM 1241, RS422/485 – 1 шт.;

- маршрутизатор SCALANCE SC632-2C – 1 шт.;
- операторська панель SIMATIC KTP900 діагональною екрана 9" – 1 шт.;
- блок живлення PM1207 – 1 шт.;
- кабель Ethernet (UTP Cat.5e) – орієнтовно 18-25 м, залежно від розташування контролера, маршрутизатора та панелі оператора [29].

4.3.5 Завантаження та виклик

Програмне забезпечення завантажується до контролера Siemens S7-1215C під час пусконаладжувальних робіт за допомогою інженерного програматора через інтерфейс Ethernet у середовищі TIA Portal. Після запису в енергонезалежну пам'ять контролера програма зберігається протягом усього строку експлуатації та не потребує повторного завантаження.

Після подачі живлення контролер автоматично ініціалізує систему та переходить до виконання основного циклу. Вхідною точкою є організаційний блок Main [OB1], у якому здійснюється виклик усіх функціональних блоків, що реалізують алгоритми керування дистиляційно-ректифікаційною ділянкою. Програма запускається автономно та не потребує взаємодії з ПК під час роботи [29].

4.3.6 Вхідні та вихідні дані

Вхідні та вихідні дані програми формуються відповідно до конфігурації апаратних модулів контролера S7-1200 та є невід'ємною частиною структури проєкту TIA Portal.

Усі сигнали, що використовуються в програмі керування — дискретні, аналогові, комунікаційні та службові – організовані у вигляді тегів (PLC tags) та структур (DB), що автоматично інтегруються у програмний код [29].

Повний перелік вхідних та вихідних сигналів кіберфізичної системи дистиляції-ректифікації, включаючи адреси, типи даних та функціональне призначення, наведений у Додатку А.

4.4 Оцінка техніко-економічної результативності кіберфізичної системи

Запровадження розробленого програмного забезпечення у складі КФС ДР забезпечує більш точне, стабільне та безпечне керування технологічними процесами. Завдяки автоматизованому контролю режимів, своєчасному реагуванню на відхилення та оптимізації роботи обладнання досягається підвищення продуктивності та зменшення енерговитрат.

Економічний ефект від використання програми інтегрується у загальну ефективність впровадження системи автоматизації й не виділяється окремо, проте саме програмний модуль відіграє ключову роль у підвищенні надійності та ефективності роботи дистиляційно-ректифікаційної ділянки [29].

ВИСНОВОК

1. Розроблено програмне забезпечення КФС ДР ділянки та обґрунтовано його технічні характеристики. Сформовано структуру програми, визначено її функціональні можливості, вхідні та вихідні дані, а також засоби технічної реалізації.

2. Програмне забезпечення забезпечує узгоджену роботу всіх елементів технологічного комплексу, реалізує алгоритми керування, захисту та діагностики, а також гарантує стабільність та безпечність процесу дистиляції та ректифікації.

3. Розроблена програма є невід'ємною складовою КФС та створює основу для автоматизованого, надійного та енергоефективного керування виробничими процесами лінії з виготовлення спирту.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Мета і завдання експерименту

Мета експерименту – за допомогою дослідження перевірити дієздатність графів КФС ДР.

Завдання передбачає виконання контрольного прикладу для визначених типів графів:

4. процесу дистиляції-ректифікації;
5. запуску насосів;
6. включення паророзподільників;
7. включення та виключення засувки-клапанів;

5.2 Підготовка експерименту

Потрібно провести виробування КФС ДР.

У рамках виконання дослідження будуть застосовані такі компоненти та технічні засоби:

– комп'ютер із встановленою платформою Siemens TIA Portal V14, що використовується для розробки, тестування та завантаження програм у контроллер;

– проєкт з назвою Program Dest-Rect, завантажений у середовище Siemens TIA Portal V14 проєкт, що містить налаштоване програмне забезпечення, реалізоване на контролері S7-1215C з підключеними модулями введення-виведення, характеристики яких наведені відповідно до таблиці 5.1, та показано (у рисунку 5.1).

– програмний модуль S7-PLCSim V14.1, який забезпечує віртуальне відтворення роботи ПЛК та використовується на цьому ж персональному комп'ютері.

Таблиця 5.1 – Специфікація Siemens, що використана у проєкті Program Dest-Rect

№	Найменування	Кіль.	Примітки
1.	Контролер CPU 1215C AC/DC/Rly	1	
2.	Модуль дискретного вводу-виводу SIMATIC SM 1223 DI 16x16 DC/DQ Relay	1	
3.	Модуль аналогового введення SIMATIC SM 1231, AI 4x16BIT	1	
4.	Комунікаційний модуль CM 1241, (RS422/485)	1	

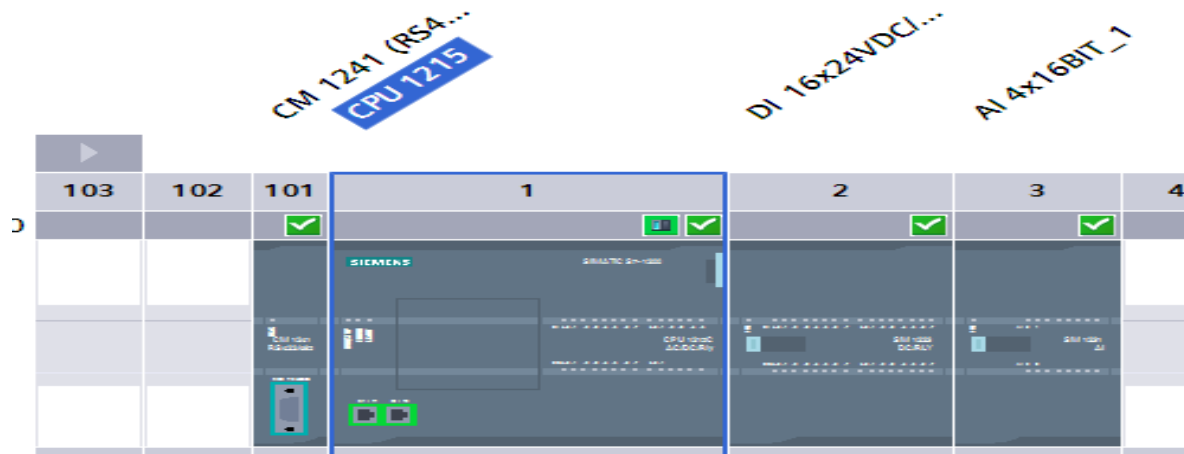


Рисунок 5.1 – КТЗ КФС ДР в проєкті

5.3 Програма та методика експериментальних досліджень

Програма та методика експериментальних досліджень подані у форматі контрольного прикладу, поєднаного з протоколом випробувань.

5.3.1 Підготовчі операції

1. Відкрити програму Siemens TIA Portal V14 і завантажити в нього проєкт Program Dest-Rect.

2. В організаційному блоці Main заблокуємо гілки, що продемонстровано (на рисунку 5.2).

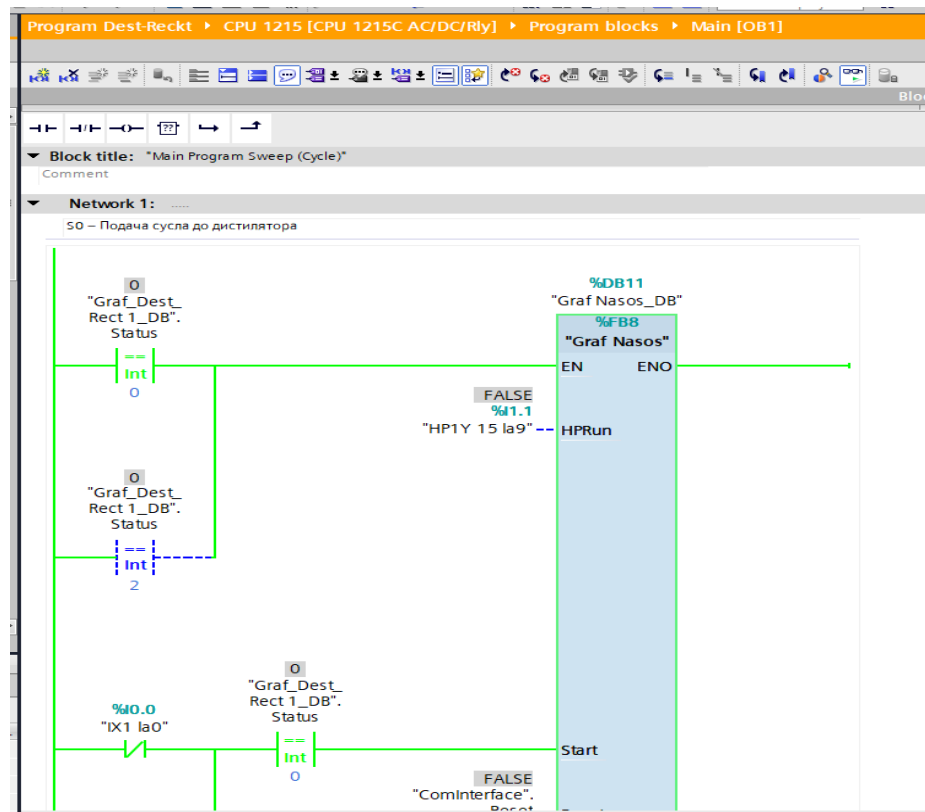


Рисунок 5.2 – Блокування гілок в блоці Main

3. Необхідно запустити симулятор S7-PLCSim V14.1 та у вікні, що відкривається (рисунок 5.3), увімкнути живлення натисненням відповідної кнопки. Після цього слід зачекати, доки індикатор стане зеленим, що означає готовність симулятора.



Рисунок 5.3 – Симулятор S7-PLCSim V14

4. У середовищі TIA Portal у дереві проєкту (Project tree) в розділі Online

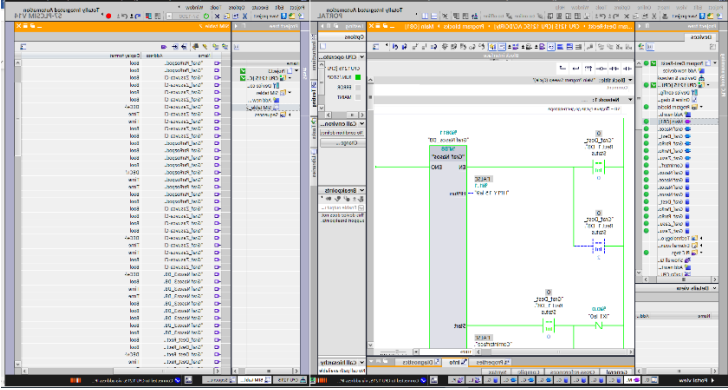
access\PLCSIM потрібно вибрати команду Update accessible devices. Після оновлення списку доступних пристроїв у цьому ж розділі має з'явитися під папка з назвою S7-1200 CPU, що підтверджує успішне виявлення симульованого контролера.

5. Здійснити компіляцію проєкту та виконати його завантаження в симулятор. Після цього встановити режим роботи контролера в положення RUN. Переконайтеся, що індикатор RUN/STOP у вікні S7-PLCSIM засвітився зеленим, що підтверджує успішний запуск програми.

5.3.2 Приклад і протокол випробувань

Перевірка першого режиму продемонстровано відповідно до таблиці 5.2, та (на рисунку 5.4).

Таблиця 5.2 – Приклад і протокол випробувань першого режиму

№ п/п	Дія	Результат
1.	Відкрити блок бази даних та функціональний блок Main. Зробити «Розділення області та редагування навіпіл». Зменшити вікно проєкту та сервісну групу справа.	З'являється таке вікно:  Рисунок 5.4 – Зовнішній вид інтерфейсу для випробувань
2.	Увімкнути режим онлайн-моніторингу для обох вікон у зоні редагування.	Заголовкові панелі обох вікон змінили колір на оранжевий.
3.	Присвоїти “DB11”. Status: =1	Змінна #”Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 0 в Main “DT_BC”.State==0
4.	Присвоїти “DB11”. Status: =2	Змінна #”Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 0 в Main “DT_BC”.State==2

Продовження таблиці 5.2

5.	Присвоїти “DB11”. Comand: = “HPRun”.	“HP1Y 15 Ia9” = “HPRun”
6.	Присвоїти “DB11”. Comand: = “Start”.	При спрацюванні датчика “IX1 Ia0” Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 0 Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 2
7.	Присвоїти “DB11”. Comand: = “Reset”.	Змінана # “Cominterface”.Reset

Перевірка другого режиму продемонстровано відповідно до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Приклад і протокол випробувань другого режиму

1.	Присвоїти “DB3”. Comand: = “EN”.	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 1 Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 2 Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 3
2.	Присвоїти “DB3”. Comand: = “PP1Run”.	“PP1Y 39 Ia7” = “PP1Run”
3.	Присвоїти “DB3”. Comand: = “Start”.	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 1 «T1 6 Ai0.1» При температурі 85 Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 3
4.	Присвоїти “DB3”. Comand: = “Reset”.	Змінана # “Cominterface”.Reset
5.	Присвоїти “DB3”. Comand: = “Qas”.	“PP1 X 41 Qa2” = “Qa”

Перевірка третього режиму продемонстровано відповідно до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Приклад і протокол випробувань третього режиму

1.	Присвоїти “DB6”. Comand: = “EN”	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 2 Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 3
2.	Присвоїти “DB6”. Comand: = “HVRun”	HVRun = “HV2X 33 Qa6”
3.	Присвоїти “DB6”. Comand: = “Start”	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 2 Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 3 При спрацюванні датчика “IX8 Ia3”
4.	Присвоїти “DB6”. Comand: = “Reset”	Змінна # “Cominterface”.Reset
5.	Присвоїти “DB6”. Comand: = “Qa”	HV5X 36 Qa9” = Qa

Перевірка четвертого режиму продемонстровано відповідно до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Приклад і протокол випробувань четвертого режиму

	Присвоїти “DB8”. Comand: = “EN”	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 5
	Присвоїти “DB8”. Comand: = “PP2Run”	“PP2Y 40 Ia8” = “PP2Run”
	Присвоїти “DB8”. Comand: = “Start”	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 5 «T2 9 Ai0.2» При температурі 85
	Присвоїти “DB8”. Comand: = “Reset”	Змінана # “Cominterface”.Reset
	Присвоїти “DB8”. Comand: = “Qa”	“PP2X 42 Qa3” = Qa

Перевірка п'ятого режиму продемонстровано відповідно до таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Приклад і протокол випробувань п'ятого режиму

1.	Присвоїти "DB4". Comand: = "ENS"	Змінна #"Graf_Dest_Rect 1_DB".Status == 4
2.	Присвоїти "DB4". Comand: = "HVRun"	"HV5Y 29 Ia4" = "HVRun"
3.	Присвоїти "DB4". Comand: = "Start"	Змінна #"Graf_Dest_Rect 1_DB".Status == 3
4.	Присвоїти "DB4". Comand: = "Reset"	Змінана # "Cominterface".Reset
5.	Присвоїти "DB4". Comand: = "Qa"	"HV5X 39 Qa9" = Qa

Перевірка шостого режиму продемонстровано відповідно до у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Приклад і протокол випробувань шостого режиму

1.	Присвоїти "DB7". Comand: = "EN"	Змінна #"Graf_Dest_Rect 1_DB".Status == 5
2.	Присвоїти "DB7". Comand: = "HPRun"	"HP3Y 17 Ia11" = "HPRun"
3.	Присвоїти "DB7". Comand: = "Start"	Змінна #"Graf_Dest_Rect 1_DB".Status == 5
4.	Присвоїти "DB7". Comand: = ""	Змінана # "Cominterface".Reset
5.	Присвоїти "DB7". Comand: = "Qa"	"HP3X 22 Qa2" = Qa
6.	Присвоїти "DB12". Comand: = "EN"	Змінна #"Graf_Dest_Rect 1_DB".Status == 5

Продовження таблиці 5.7

7.	Присвоїти “DB12”. Comand: = “HPRun”	“HP4Y 18 Ia12” = “HPRun”
8.	Присвоїти “DB12”. Comand: = “Start”	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 5
9.	Присвоїти “DB12”. Comand: = “”	Змінана # “Cominterface”.Reset
10.	Присвоїти “DB12”. Comand: = “Qa”	“HP4X 23 Qa3” = Qa
11.	Присвоїти “DB13”. Comand: = “EN”	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 5
12.	Присвоїти “DB13”. Comand: = “HPRun”	“HP5Y 19 Ia13” = “HPRun”
13.	Присвоїти “DB13”. Comand: = “Start”	Змінна #“Graf_Dest_Rect 1_DB”.Status == 5
14.	Присвоїти “DB13”. Comand: = “”	Змінана # “Cominterface”.Reset
15.	Присвоїти “DB13”. Comand: = “Qa”	“HP5X 24 Qa4” = Qa

5.3.3 Перевірка роботи насосу

Приклад і протокол випробувань графу насосу продемонстровано відповідно до у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Приклад і протокол випробувань графу насосу

1.	Присвоїти “Graf Nasos”. Status: = 0	Змінна #Status == 0 Змінна #Start Перехід до стану 1 (1 <Move > #Status) Змінна #Qa = (S)
----	--	--

Продовження таблиці 5.8

2.	Присвоїти "Graf Nasos". Status: = 1	Помилка змінна #HPRun Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status) Змінна #Qa (R)
3.	Присвоїти "Graf Nasos". Status: = 2	Змінна #Status == 2 Змінна #Start Перехід до стану 3 (3 <Move > #Status) Змінна #Qa (R) Помилка змінна #HPRun Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status) Змінна #Qa (R)
4.	Присвоїти "Graf Nasos". Status: = 3	Змінна #Status == 3 Змінна таймер #Status = t#500ms Завершення змінна #HPRun Перехід до стану 0 (0 <Move > #Status) Помилка змінна #HPRun Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status)
5.	Присвоїти "Graf Nasos". Status: = 4	Змінна #Status == 4 Змінна #Reset Перехід до стану 0 (0 <Move > #Status)

5.3.4 Перевірка роботи паророзподільника

Приклад і протокол випробувань графу парового розподільника 1 та продемонстровано відповідно до таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Приклад і протокол випробувань графу парового розподільника 1 та 2

1.	Присвоїти “Graf_ParRozpod1-2”. Status: = 0	Змінна #Status == 0 Змінна #Start Перехід до стану 1 (1 <Move > #Status) Змінна #Qa = (S)
2.	Присвоїти “Graf_ParRozpod1-2”. Status: = 1	Змінна #Status == 1 Змінна #Status = t#500ms Змінна # PP1-2Run Перехід до стану 2 (2 <Move > #Status) Помилка змінна # PP1-2Run Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status) Змінна #Qa (R)
3.	Присвоїти “Graf_ParRozpod1-2”. Status: = 2	Змінна #Status == 2 Змінна #Start Перехід до стану 3 (3 <Move > #Status) Змінна #Qa (R) Помилка змінна # PP1-2Run Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status) Змінна #Qa (R)
4.	Присвоїти “Graf_ParRozpod1-2”. Status: = 3	Змінна #Status == 3 Змінна таймер #Status = t#500ms Завершення змінна # PP1-2Run Перехід до стану 0 (0 <Move > #Status) Помилка змінна # PP1-2Run Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status)

Продовження таблиці 5.9

5.	Присвоїти “Graf_ParRozpod1-2”. Status: = 4	Змінна #Status == 4 Змінна #Reset Перехід до стану 0 (0 <Move > #Status)
----	--	--

5.3.5 Перевірка роботи засувки-клапана

Приклад і протокол випробувань графу засувки-клапана продемонстровано відповідно до таблиці 5.10.

Таблиця –5.10 Приклад і протокол випробувань графу засувки-клапана

1.	Присвоїти “Graf_Zasuvca-Clapan”. Status: = 0	Змінна #Status == 0 Змінна #Start Перехід до стану 1 (1 <Move > #Status) Змінна #Qa = (S)
2.	Присвоїти “Graf_Zasuvca-Clapan”. Status: = 1	Змінна #Status == 1 Змінна #Status = t#500ms Змінна # HVRun Перехід до стану 2 (2 <Move > #Status) Помилка змінна # HVRun Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status) Змінна #Qa (R)
3.	Присвоїти “Graf_Zasuvca-Clapan”. Status: = 2	Змінна #Status == 2 Змінна #Start Перехід до стану 3 (3 <Move > #Status) Змінна #Qa (R) Помилка змінна #HVRun Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status) Змінна #Qa (R)

Продовження таблиці 5.10

4.	Присвоїти “Graf_Zasuvca-Clapan”. Status: = 3	Змінна #Status == 3 Змінна таймер #Status = t#500ms Завершення змінна # HVRun Перехід до стану 0 (0 <Move > #Status) Помилка змінна # HVRun Перехід до аварійного стану 4 (4 <Move > #Status)
5.	Присвоїти “Graf_Zasuvca-Clapan”. Status: = 4	Змінна #Status == 4 Змінна #Reset Перехід до стану 0 (0 <Move > #Status)

5.3.6 Перевірка роботи дистиляції-ректифікації

Приклад і протокол випробувань графу дистиляції ректифікації продемонстровано відповідно до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Приклад і протокол випробувань графу дистиляції ректифікації

Присвоїти “Graf_Dest_Rect 1”. Status: = 0	Змінна #Status == 0 Змінна #Ready Перехід до стану 1 (1 <Move > #Status) Змінна #Qa = (S)
Присвоїти “Graf_Dest_Rect 1”. Status: = 1	Змінна #Status == 1 Змінна #Timer = t#200ms Змінна # Start Перехід до стану 0 (0 <Move > #Status) Помилка змінна # HVRun Перехід до аварійного стану 2 (2 <Move > #Status) Змінна #Qa (R)
Присвоїти “Graf_Dest_Rect 1”. Status: = 2	Змінна #Status == 2 Змінна #Reset Перехід до стану 0 (0 <Move > #Status)

5.4 Аналіз результату експериментів

За підсумками виконання контрольного прикладу встановлено повну відповідність отриманих результатів даним, наведеним у таблицях 5.2–11, що підтверджує працездатність графів та програмного забезпечення кіберфізичної системи дистиляції-ректифікації.

ВИСНОВОК

У ході виконання було перевірено роботу програмного забезпечення кіберфізичної системи дистиляції-ректифікації. Результати експерименту показали, що розроблені графи станів коректно описують послідовність роботи обладнання та забезпечують правильний перехід між технологічними режимами. Це підтверджує можливість використання графів-автоматів для керування процесами дистиляції та ректифікації і доводить працездатність запропонованого підходу до автоматизації ділянки.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота є завершеною науково-практичною роботою, у якій вирішено задачу дослідження, аналізу та автоматизованого керування процесами дистиляції і ректифікації спирту шляхом розробки та впровадження кіберфізичної системи керування дистиляційно-ректифікаційною ділянкою спиртового виробництва.

Основні висновки і результати роботи полягають у наступному:

1. Досліджено технологічний процес дистиляції та ректифікації спирту, визначено основні технологічні параметри, що впливають на стабільність процесу, якість готової продукції та безпечність експлуатації обладнання. Показано складний характер взаємозв'язків між параметрами процесу, що обґрунтовує доцільність застосування автоматизованого керування з використанням кіберфізичної системи.

2. Проведено аналіз роботи основних апаратів і допоміжних пристроїв дистиляційно-ректифікаційної ділянки, визначено їх функціональні взаємозв'язки та режими роботи. На підставі аналізу встановлено обмеження традиційних систем керування та обґрунтовано необхідність інтеграції фізичного обладнання з цифровими моделями процесу.

3. Розроблено структуру кіберфізичної системи керування дистиляційно-ректифікаційною ділянкою, яка забезпечує узгоджену роботу технологічного обладнання, систем контролю та керування, а також взаємодію між фізичним і цифровим рівнями системи.

4. Побудовано графі станів, що формалізують послідовність функціонування технологічного обладнання, умови переходів між технологічними режимами, а також реакцію системи на аварійні та нестандартні ситуації. Використання графів станів дозволило структурувати алгоритми керування та підвищити надійність і передбачуваність роботи системи.

5. Обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, виконано узгодження апаратної частини з вимогами технологічного процесу та

підтверджено її відповідність умовам експлуатації, надійності й можливості масштабування.

6. Розроблено програмне забезпечення кіберфізичної системи, яке реалізує функції керування, контролю, захисту та діагностики, забезпечує узгоджену роботу всіх елементів комплексу та створює умови для стабільної і безпечної експлуатації дистиляційно-ректифікаційного обладнання.

7. Проведено експериментальну перевірку працездатності розробленої кіберфізичної системи, яка підтвердила коректність роботи програмних алгоритмів і графів-автоматів, а також відповідність отриманих результатів поставленим вимогам.

8. Отримані результати доводять можливість практичного застосування запропонованої кіберфізичної системи для автоматизованого, безпечного та енергоефективного керування процесами дистиляції та ректифікації спирту на сучасних спиртових виробництвах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Проєктування та експлуатація процесів виробництва етанолу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308512000302?> – Дата звернення: 25.09.2025.
2. Останні досягнення у технології дистиляції алкоголю [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.mdpi.com/2305-7084/9/3/59> – Дата звернення: 25.09.2025.
3. Проєктування та впровадження автоматизації на основі кіберфізичної системи на хімічному виробництві [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.researchgate.net/publication/328912077> – Дата звернення: 26.11.2025.
4. Наші замовники: алкогольна промисловість [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://organika-engineering.com/nashi-zamovniki/alcoholindustry> – Дата звернення: 25.09.2025.
5. З чого роблять спирт люкс-класу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://opal.net.ua/z-chogo-roblyat-spyrt-lyuks-klasu/> – Дата звернення: 25.09.2025.
6. Лекційний матеріал: Дистиляція [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:a431440315da9066760766d0c931a08acfc9ca64/20250902093621/316645/index.html – Дата звернення: 05.10.2025.
7. Ректифікаційна колона з нержавіючої сталі та міді [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.fujianyiyi.com/Stainless-Steel-Copper-Reflow-Moonlight-Alcohol-still-Distills-Tank-Steamng-Equipment-Tanks-pd570240358.html> – Дата звернення: 05.10.2025.
8. Перегонка бражки і ректифікація спирта [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://bts.net.ua/eng/news/peregonka-brazhki-i-rektifikatsiya-spirta->

[eng/?srsltid=AfmBOop_wKellj_1reuR6VVGawZ1TTONMOJpuZqJQb_xE-PsDu3orwBA](#) – Дата звернення: 05.10.2025.

9. Ректифікаційна колона [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ректифікаційна_колона – Дата звернення: 05.10.2025.

10. Process Cooling Water Skids – огляд рішення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.skidsolutions.com/blog/process-cooling-water-skids> – Дата звернення: 05.10.2025.

11. Насос Debem DM30 з магнітною муфтою [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: https://www.debem.com.ua/ukr/nasos/nasosy_s_magnitnoj_muftoj/dm30 – Дата звернення: 05.10.2025.

12. Поплавковий датчик рівня ПДУ-31 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://contragent.kh.ua/ua/poplavkovij-datchik-rivnja-pdu-31-ua> – Дата звернення: 05.10.2025.

13. Соленоїдні клапани: принцип роботи та вибір [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://spc.com.ua/blogs/solenoid-valves/operation-and-selection-of-solenoid-valves> – Дата звернення: 05.10.2025.

14. Асинхронні двигуни NORD стандартної серії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.nord.com.ua/produkcija/dwiguny/asynchronni-dwyguny/standartni-dwyguny.jsp> – Дата звернення: 05.10.2025.

15. Основи дистиляції — DIY Distilling [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://diydistilling.com/distillation-basics> – Дата звернення: 15.10.2025.

16. Етанол – основні властивості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ethanol> – Дата звернення: 15.10.2025.

17. Термоперетворювач TSP-1-3 PT100 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://svaltera.in.ua/tsp-1-3-pt100> – Дата звернення: 15.10.2025.

18. Індуктивний датчик наближення LJ8A3-2-Z/BX [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://arduino.ua/ru/prod3438-indyktivnii-datchik-priblijeniya-lj8a3-2-z-bx> – Дата звернення: 23.10.2025.

19. Застосування контакторів Siemens 3RT2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://ua.szct-control.com/info/common-applications-of-siemens-3rt2-contactors-17551267417433088> – Дата звернення: 23.10.2025.

20. Протокол Modbus: повний огляд [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.a2m.com.ua/ua/post/what-is-modbus-a-complete-guide> – Дата звернення: 29.10.2025.

21. Частотний перетворювач SINAMICS V20 – швидкий старт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.a2m.com.ua/ua/post/sinamics-v20-quick-start> – Дата звернення: 29.10.2025.

22. Програмований контролер Siemens S7-1200 CPU 1215C [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://eleksun.com.ua/uk/6es7215-1ag40-0xb0> – Дата звернення: 21.11.2025.

23. Панель оператора Siemens KTP900 Basic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://eleksun.com.ua/6av2123-2jb03-0ax0> – Дата звернення: 21.11.2025.

24. Модуль дискретного введення/виведення SM1223 16DI/16DO [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eleksun.com.ua/6es7223-1b132-0xb0-modul-diskretnogo-vvoda-vyvoda-serii-simatic-s7-1200-sm-1223-16di16do-16di24-vs>

25. Модуль аналогового вводу SM1231 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://eleksun.com.ua/uk/6es7231-5nd32-0xb0> – Дата звернення: 21.11.2025.

26. Комунікаційний модуль RS422/485 CM1241 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://eleksun.com.ua/6es7241-1ch32-0xb0> – Дата звернення: 21.11.2025.

27. Мережевий маршрутизатор Siemens 6GK5632-2GS00-2AC2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.eibabo.com/ru/siemens/setevoy-marshrutizator-6gk5632-2gs00-2ac2-eb16116441> – Дата звернення: 21.11.2025.

28. Блок живлення Siemens PM1207 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://eleksun.com.ua/uk/6ep1332-1sh71> – Дата звернення: 21.11.2025.

29. Кіберфізична система ділянки дистиляції-ректифікації на лінії з виготовлення спирту класу «Люкс» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/0d90535a-7a1f-4372-8423-17d1878e7283> – Дата звернення: 22.11.2025.

Додаток А

Текст програми кіберфізичної системи ділянки дистиляції-ректифікації лінії з виготовлення спирту

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
РОЗРОБКА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ДІЛЯНКИ ДИСТИЛЯЦІЇ-
РЕКТИФІКАЦІЇ ЛІНІЇ З ВИГОТОВЛЕННЯ СПИРТУ

Текст програми

804.02070743.25021-01 12 01

Листів 17

АНОТАЦІЯ

Дана програма містить в собі данні по розробці обґрунтування структури та параметрів кіберфізичної системи ділянки дистиляції-ректифікації лінії з виготовлення спирту.

Текст програми написано мовою LAD для ПЛК SIMATIC, відлагодження та застосування в середовищі Siemens TIA Portal V.14.

ЗМІСТ

1 Програмний блок Main [OB1].....	1
2 Програмний блок Graf_Dest_Rect_1 [FB7].....	5
3 Програмний блок GrafNasos [FB8].....	6
4 Програмний блок Graf_ParRozpod1 [FB10].....	8
5 Програмний блок Graf_ParRozpod2 [FB11].....	10
6 Програмний блок Graf_Zasuvca_Clapan [FB9].....	12
7 Таблиця ПЛК тегів La-Qa.....	14