МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Імітаційна модель автоматизованої системи установки для виробництва харчових продуктів

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1743-з-дн
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Пілат А. І.
я
Керівник доц., к.т.н. Барішенко О. М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»
Курілець І. А.

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно- інтегровані технології та робототехніка
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва)
Спеціалізація
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
"____" _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Пілату Андрію Івановичу
(прізвище, ім'я, по батьков)

1. Тема роботи (проекту) Імітаційна модель автоматизованої системи установки для виробництва харчових продуктів
керівник роботи Барішенко Олена Миколаївна, канд.техн.наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від від «30» вересня 2024 року № 1483-с
2. Строк подання студентом роботи 01 березня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Визначення особливостей технологічного процесу, розробка технічного завдання, математичне моделювання САР, розробка схема автоматизованої системи регулювання і проведення експерименту, визначення і опис небезпечних і шкідливих факторів на виробництві, розрахунок техніко-економічних показників проєкту
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Барішенко О. М.		
2	Барішенко О. М.		
3	Барішенко О. М.		
4	Барішенко О. М.		
5	Барішенко О. М.		
6	Барішенко О. М.		
7	Барішенко О. М.		

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення особливостей технологічного процесу	01.10.2024	виконано
2	Розробка технічного завдання	01.11.2024	виконано
3	Математичне моделювання САР	01.12.2024	виконано
4	Розробка імітаційної моделі автоматизованої системи	01.01.2025	виконано
5	Проведення експерименту і отримання результатів моделювання	15.01.2025	виконано
6	Визначення і опис небезпечних і шкідливих факторів на виробництві	01.02.2024	виконано
7	Розрахунок техніко-економічних показників проєкту	15.02.2025	виконано
8	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю	26.02.2025	виконано
9	Підготовка доповіді	01.03.2025	виконано

Студент _____ Андрій ПІЛАТ
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ Олена БАРІШЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Ірина ОВЧИННИКОВА
(підпис) (ініціали та прізвище)

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСУТП – автоматизована система управління технологічними процесами

АРМО – автоматизоване робоче місце оператора

ІМ – імітаційна модель

ГПУ – графічний процесор управління

ПЛК – програмований логічний контролер

ППК – прилади приймально-контрольні

САУ – система автоматизованого управління

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 4
ВСТУП 7
1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 11
1.1 Характеристика етилового спирту як сировини для виробництва харчових продуктів 11
1.2 Технології виробництва етилового спирту 13
1.3 Аналіз існуючих систем автоматизації виробництва етилового спирту 19
1.4 Опис об’єкту автоматизації 30
1.5 Постановка задачі 32
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ 34
3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ 50
3.1 Розроблення плану експерименту 50
3.2 Реалізація експерименту і результати моделювання 51
4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ І РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ 57
4.1 Синтез системи керування в програмному модулі SISOTool 57
4.2 Налаштування системи керування в програмному модулі PID Tuner 62
5 SCADA-СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ 67
6 ОХОРОНА ПРАЦІ 71
6.1. Загальні заходи з охорони праці виробництва етилового спирту 71
6.2 Охорона праці оператора АСУ ТП 73
6.3 Пожежна безпека 77
7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 79
7.1 Визначення капітальних вкладень 79
7.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат 80
7.3 Річні витрати на ЗП 80
7.4 Розрахунок річних амортизаційних відрахувань 81

7.5 Річні витрати на ремонт 82
7.6 Витрати електроенергії на живлення 82
7.7 Інші витрати 82
7.8 Річна економія експлуатаційних витрат 83
ВИСНОВКИ 88
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА 90

ВСТУП

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Етанол, як цінний продукт органічного синтезу, відіграє важливу роль у різних галузях промисловості: від харчової до медичної та хімічної. Його застосовують як розчинник, антифриз, компонент ракетного та автомобільного палива, а також у синтезі складних сполук, таких як оцтова кислота, діетиловий ефір і хлороформ. На території України виробництво етилового спирту здійснюється методами сірчанокислотної та прямої гідратації етилену. Впроваджений у 1952 році сірчанокислотний метод поступово поступився місцем прямій гідратації, яка активно впроваджується з 1990-х років. Проте, технології значно еволюціонували, і постає нагальна потреба в модернізації існуючих систем, зокрема впровадження сучасних автоматизованих рішень. Це дозволить не лише покращити економічні показники виробництва, а й забезпечити вищу якість готової продукції.

Актуальність дослідження полягає в аналізі та вдосконаленні технологічного процесу виробництва етилового спирту з етилену з акцентом на подальше очищення отриманого продукту від домішок. Розробка та впровадження імітаційної моделі автоматизованої системи установки для виробництва харчових продуктів має велике практичне значення. У харчовій промисловості автоматизація дозволяє значно підвищити точність технологічних процесів, зменшити кількість відходів і втрат, забезпечити стабільність якості продукції та оптимізувати використання ресурсів. Імітаційне моделювання є сучасним інструментом для аналізу, прогнозування та вдосконалення роботи автоматизованих систем. Воно дозволяє виявляти «вузькі місця» в процесі, досліджувати вплив різних параметрів на результат і оцінювати ефективність впроваджених змін без зупинки реального виробництва. Такий підхід сприяє інтеграції інноваційних рішень у харчову промисловість, що є

особливо актуальним для досягнення високих стандартів продукції, конкурентоспроможності підприємства та зменшення впливу на довкілля.

МЕТА, ОБ’ЄКТ, ПРЕДМЕТ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи: розробка імітаційної моделі автоматизованої системи установки виробництва етилового спирту та подальше його очищення від домішок.

Об'єкт дослідження: автоматизована система управління процесом виробництва етилового спирту.

Предмет дослідження: технологічний процес управління процесом виробництва і очищення етилового спирту.

Відповідно до поставленої мети досліджень в роботі сформульовані наступні задачі:

– сформулювати стислу характеристику об'єкта управління;

– провести огляд та аналіз рішень з управління процесом виробництва і очищення етилового спирту;

– розробити математичну модель роботи системи управління процесом виробництва і очищення етилового спирту;

– провести дослідження статичного і динамічного режимів об’єкта керування;

– спроектувати імітаційну модель автоматизованої системи установки виробництва етилового спирту та подальше його очищення від домішок;

– проаналізувати адекватність розробленої системи;

– розглянути організацію охорони праці, провести аналіз умов праці та визначити заходи зниження впливу небезпечних і шкідливих факторів;

– виконати розрахунок економічного обґрунтування проекту та визначити економічну ефективність впровадженої автоматизованої системи управління технологічним процесом.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження використовуються методи математичного моделювання – створення математичних моделей процесу виробництва і очищення етилового спирту. використанням різних методів, таких як рівняння теплопереносу, кінетичні рівняння хімічних реакцій. Ці моделі можуть використовуватися для прогнозування поведінки системи та оптимізації управління нею. Використання спеціалізованих програмних засобів для комп’ютерного моделювання та аналізу процесів в хімічній промисловості. Це дозволяє швидко та ефективно проводити різноманітні симуляції та оптимізаційні розрахунки. Застосовано також емпіричні методи – аналіз результатів попередніх досліджень та досвіду виробництва для визначення оптимальних умов виробництва і очищення етилового спирту. А також статистичних методів для обробки та аналізу експериментальних даних з метою виявлення закономірностей та встановлення зв'язків між різними параметрами процесу.

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Проведено порівняльний аналіз апаратів для виробництва і очищення етилового спирту.

2. Розроблена математична модель холодильника-конденсатора, як технологічного апарату, призначеного для конденсування пари речовин.

3. Було знайдено налаштування регуляторів за допомогою метода М-кола, програмного засобу SISOTool та PID Tuner. Останній із них виявився найефективнішим оскільки ми змогли згенерувати найкращі налаштування регулятора виходячи з якісних характеристик отриманої замнутої системи.

4. Аналіз інформації з графіків редактора Tuner з налаштуванням П-, ПІ і ПІД-регуляторів дав обґрунтуваннях оптимальності використання ПІД-регулятора з отриманими налаштуваннями, оскільки час регулювання при цьому був найменший і дорівнював 252 с, а час перерегулювання був близько 0%.

5. Досліджено метод статичної оптимізації теплообмінників та створено його SCADA-систему.

6. Розраховано техніко-економічні показники з обґрунтуванням доцільності проєкту в сучасних економічних умовах ринку.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

Практичне значення отриманих результатів роботи – розроблена імітаційна модель автоматизованої системи установки виробництва етилового спирту та подальше його очищення від домішок спрямована на виготовлення високоякісної продукції з мінімальними витратами на виробництво. В майбутньому розроблена модель має перспективи розвитку та модифікацій.

ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК

Теоретичні дослідження виконані автором самостійно. Здобувачем визначено стан і тенденції розвитку теоретично-експериментальних досліджень обладнання для виробництва етилового спирту та подальше його очищення від домішок, сформульовано мету й постановку завдань досліджень, розроблено методи та способи досягнення поставленої мети, розроблено узагальнену математичну модель виробництва етилового спирту в холодильнику-конденсаторі. Здобувачем також здійснено наукове обґрунтування теоретично-експериментальних досліджень.

СТРУКТУРА МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Магістерська робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку літератури із 49 найменувань і вміщує 83 сторінки основного тексту, 4 таблиці, 36 рисунків, усього 95 сторінок.

1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Характеристика етилового спирту як сировини для виробництва харчових продуктів

Етиловий спирт (етанол, винний спирт) – це органічна сполука, що належить до одноатомних спиртів. У звичайних умовах він є прозорою, безбарвною рідиною з характерним запахом і пекучим смаком. Етанол добре змішується з водою у будь-яких пропорціях, а також з багатьма іншими органічними речовинами, такими як гліцерин, бензол, метанол, сірчастий ефір, трихлорметан, етанова кислота та ацетон, що робить його чудовим розчинником.

Етиловий спирт (етанол) – це леткий, горючий одноатомний спирт. У звичайних умовах виглядає як прозора безбарвна рідка речовина, що має різкий специфічний запах і гірко-пекучий смак. Важить етанол менше, ніж вода.

Фізичні властивості [41]:

- густина – 0,7893 г/см^3;
- температура плавлення – мінус 114,3 °С;
- температура кипіння – 78,4 °С;
- температура спалаху – 13 °С;
- температура самозаймання – 363 °С;
- температура замерзання – мінус 117°С;
- молекулярна маса – 46,069 г/моль.

Окрім здатності розчиняти органічні сполуки, етанол також активно поглинає вологу, як із повітря, так і з живих тканин рослинного або тваринного походження, що сприяє їхній деструкції. Хімічно чистий етиловий спирт має нейтральну реакцію, однак харчовий спирт зазвичай проявляє слабокислу реакцію через наявність у ньому залишкових

органічних кислот.

В хімічній промисловості етанол використовують для синтезу великої кількості субстанцій (сірчаного ефіру, оцтової кислоти, етану, етилового ефіру, етену, тетрасвинцю та багато інших). Він входить в склад автомобільних засобів для омивання скла та охолоджувальних, морозостійких рідин.

Етиловий спирт відіграє важливу роль у медицині завдяки своїм унікальним властивостям. Його часто використовують як розчинник для медичних препаратів, а також як екстрагент для вилучення окремих компонентів із рідких сумішей, таких як водні розчини. У складі різноманітних розчинів, настоянок і екстрактів етанол виконує функцію консерванту, запобігаючи розвитку мікроорганізмів і подовжуючи термін придатності препаратів.

Етиловий спирт також має широкий спектр застосувань у лікувальній практиці:

– використовують для розтирання тіла при високій температурі, щоб знизити гарячку;

– етиловий спирт є основним компонентом компресів, які застосовуються ;

– для покращення кровообігу та зменшення болю у разі відсутності більш ефективних анестетиків етанол може бути використаний для загальної анестезії.

– у процесах подачі кисню або штучної вентиляції легенів етанол допомагає зменшити піноутворення в дихальних шляхах;

– етанол є єдиним ефективним засобом у випадках отруєння метанолом, оскільки блокує перетворення метанолу в токсичні метаболіти.

Етанол широко використовується у харчовій промисловості як універсальний компонент. В кодексі Європейського Союзу – Codex Alimentarius [41], який прийнято в 1963 р., в класифікації харчових добавок відомий під номером Е1510.

Етанол є основною складовою багатьох алкогольних напоїв, таких як горілка, вино, пиво та лікери. Завдяки своїм розчинним властивостям етанол використовується для отримання екстрактів із рослин, фруктів або спецій, які додають до харчових продуктів для поліпшення смаку та аромату. Антисептичні властивості етанолу допомагають збільшувати термін зберігання продуктів. Етанол виступає розчинником для виготовлення рідких харчових барвників і стабілізаторів. Етанол використовується для створення деяких видів цукерок, лікерних начинок і десертів. Його застосовують для обробки харчового обладнання, упаковок і поверхонь, що контактують із продуктами. Завдяки універсальності і розчинним властивостям етиловий спирт є незамінним інгредієнтом і допоміжною речовиною в харчовій промисловості, проте його використання вимагає дотримання суворих норм безпеки через його вогненебезпечність та потенційний вплив на здоров’я.

1.2 Технології виробництва етилового спирту

Виробництво етилового спирту стандартизовано нормативним актом. ДСТУ 3296-95 Виробництво етилового спирту з харчової сировини. Терміни та визначення. Зі змінами № 1, 2.

Етиловий спирт виробляють двома способами:

– мікробіологічним (біохімічним, шляхом спиртового бродіння, зброджування цукрів дріжджами);

– хімічним (синтетичним, гідратацією етилену).

Джерелами в першому випадку виступають рослинні сировинні компоненти, в складі яких міститься багато вуглеводів.

Технологічний процес виробництва етилового спирту складається з кількох основних етапів:

– первинна обробка сировини (подрібнення матеріалу);

– термічна обробка з додаванням води (зокрема розварювання для

отримання водно-вуглеводного розчину) та подальще його оцукрення;

– розброджування дріжджів для подальшого додавання до розчину;

– зброджування розчину;

– відокремлення спирту-сирцю з бражки;

– очищення спирту-сирцю.

Спиртове бродіння – це один із найдавніших способів отримання етилового спирту. Цей процес є складною реакцією, у якій на вуглеводовмісну сировину впливають ферменти дріжджів (переважно Saccharomyces cerevisiae) та бактерій. У результаті бродіння утворюється розчин із вмістом до 15% етанолу, оскільки при більшій концентрації дріжджі втрачають життєздатність. Подальше очищення отриманого розчину досягається методом дистиляції. Як поживне середовище часто використовують оброблену деревну тирсу або розчини на її основі.

Промисловий процес виробництва спирту включає етапи підготовки сировини, ферментації, бродіння та брагоректифікації. На виході утворюється не лише етиловий спирт, а й побічні продукти, такі як вуглекислий газ, барда, ефіроальдегідна фракція, сивушний спирт і сивушні олії. Спирт після брагоректифікації містить до 95,6% етанолу, воду та сторонні домішки, які впливають на його якість і класифікацію (наприклад, Альфа, Люкс, Екстра, вищого очищення тощо).

Гідролізне виробництво базується на обробці целюлозовмісної сировини. У процесі гідролізу утворюються пентози та гексози, які потім зброджуються.

Гідратація етилену може здійснюватися двома способами:

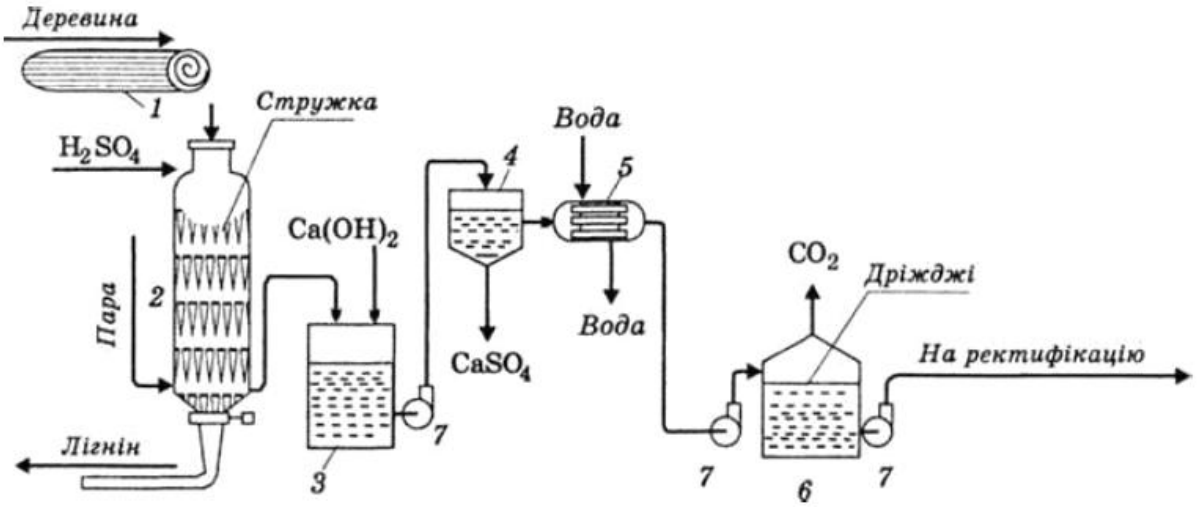
1. Пряма гідратація за температури 300°C і тиску 7 МПа з використанням каталізаторів (ортофосфорна кислота на силікагелі, активоване вугілля тощо).

2. Гідратація з утворенням ефіру з подальшим його гідролізом. Цей метод проходить за нижчих температур (80–90°C) і тиску 3,5 МПа, але вимагає очищення від сірчаного ефіру.

Особливу увагу приділяють очищенню спирто-водної суміші, отриманої будь-яким методом. Для цього використовують фракційну дистиляцію, яка дозволяє видалити легколеткі та важкі фракції органічних речовин, отримуючи спирт із чистотою 95,6%. Для отримання абсолютного спирту, з мінімальним вмістом води, застосовують додаткові методи, як-от обробка негашеним вапном чи прожареним мідним купоросом, або дистиляцію з бензолом.

Ці технологічні процеси забезпечують високий рівень очищення продукту, що дозволяє використовувати етиловий спирт у різних галузях: харчовій, медичній, хімічній тощо.

На рисунку 1.1 наведена схема виробництва етанолу гідратацією деревини.



1 – стрічковий транспортер; 2 – гідролізатор; 3 – нейтралізатор;
4 – відстійник; 5 – холодильник; 6 – бродильна ємкість; 7 – насоси

Рисунок 1.1 – Схема виробництва етанолу гідратацією деревини

Цей метод менш екологічний і має кілька недоліків, серед яких велика кількість домішок і характерний запах. Через це спирт, отриманий таким способом, здебільшого придатний лише для технічного використання.

Метод гідратації етилену може реалізовуватися двома основними шляхами:

Гідратація з утворенням ефіру. Спочатку відбувається утворення ефіру, який потім гідролізують. Для цього створюють спеціальні умови: температура 80-90°С і тиск 3,5 МПа.

Пряма гідратація. У цьому випадку сировина в парогазовому стані взаємодіє з каталізаторами, такими як ортофосфорна кислота, нанесена на активоване вугілля або силікагель. Процес відбувається за високої температури (300°С) і тиску (7 МПа).

Незалежно від обраного способу (бродіння чи гідратація), на виході отримують спирто-водну суміш із домішками, які потрібно видалити. Для цього застосовують фракційну дистиляцію, яка дозволяє отримати до 95,6% чистого спирту, позбавленого легколетких і важких органічних домішок (так званий кубовий залишок).

Для отримання абсолютного спирту, у якому практично немає води, використовують додаткові методи. Наприклад, спирт, що містить бензол, піддають спеціальній дистиляції, або обробляють речовинами, які взаємодіють із водою або поглинають її, такими як негашене вапно чи прожарений мідний купорос.

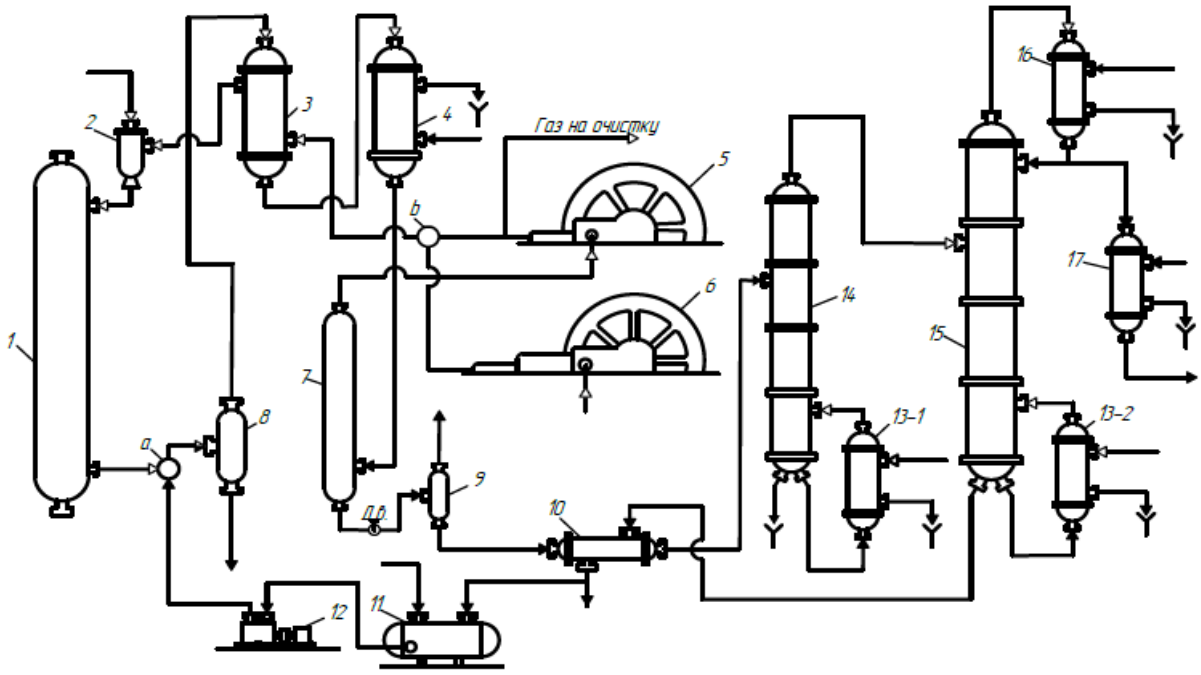
Ці технологічні етапи дозволяють значно покращити якість спирту, роблячи його придатним для використання у різних сферах.

На рисунку 1.2 зображено досліджувану схему хіміко-технологічної системи виробництва етилового спирту з етилену [3].

У контактний апарат під тиском близько 80 атмосфер подається суміш етилену та водяної пари. Для забезпечення оптимальних умов реакції молярне співвідношення водяної пари до етилену підтримується в межах 0,6-0,75.

Свіжий етилен, отриманий із цеху розділення вуглеводневих газів, подається до системи за допомогою компресора. Одночасно оборотний етилен циркулює через систему завдяки окремому компресору. Обидва

потоки змішуються в трійнику.



1 – гідрататор; 2 – паровий ежектор; 3 – теплообмінник-рекуператор; 4,17 – холодильник-конденсатор; 5 – циркуляційний компресор; 6 – компресор; 7 – сепаратор високого тиску; 8 – солевіддільник; 9 – сепаратор низького тиску; 10 – теплообмінник; 11 – збірник розчину лугу; 12 – насос високого тиску; 13 – кип'ятильник; 14 – відпарна колона; 15 – ректифікаційна колона; 16 – дефлегматор; a,b – трійник; Д.в – дросельний вентиль

Рисунок 1.2 – Хіміко-технологічна система виробництва етилового спирту з етилену

Після цього газову суміш нагрівають у теплообміннику до температури 220-230°С, використовуючи тепло продуктів реакції, що виходять із контактного апарата. Далі підігрітий газ змішують в ежекторі з перегрітою водяною парою.

Температура процесу гідратації підтримується на рівні 280-300°С. У такому стані парогазова суміш потрапляє до контактного апарата, де відбувається основна реакція.

Продукти синтезу, що виходять із контактного апарата, містять невелику кількість фосфорної кислоти. Вона може викликати корозію трубопроводів і обладнання на наступних етапах процесу. Щоб уникнути цього, кислоту нейтралізують лугом, який подається насосом високого тиску зі збірника у трійник, розташований поблизу контактного апарата.

Після цього продукти синтезу проходять через солевіддільник, де видаляються тверді домішки, і надходять до теплообмінника та холодильника-конденсатора. Тут вони охолоджуються, а водяна пара та спирт конденсуються.

Концентрація етилену в газовій суміші підтримується на рівні 80–85% для забезпечення ефективності процесу. Щоб уникнути накопичення інертних газів у циркуляційному потоці, частина циркулюючого газу постійно відводиться в цех розділення вуглеводневих газів.

Розведений спирт, що утворюється в сепараторі високого тиску, проходить через дросельний вентиль і потрапляє в сепаратор низького тиску. Тут через зниження тиску виділяється розчинений етилен, який повертається у компресорну систему або до цеху розділення газів.

Водний розчин спирту спрямовується на етап концентрування. Спочатку його підігрівають у теплообміннику за допомогою кубової рідини ректифікаційної колони, а потім направляють у відпарну колону. Кубова рідина цієї колони містить розчин фосфатів, які утворилися внаслідок нейтралізації фосфорної кислоти. Пари з верхньої частини відпарної колони далі направляються в ректифікаційну колону для остаточного очищення та концентрування спирту.

Дистилят, отриманий з ректифікаційної колони, представляє собою концентрований етиловий спирт, який є кінцевим товарним продуктом виробництва. Кубову рідину застосовують у теплообміннику для нагрівання розведеного спирту, а також для розчинення лугу у збірнику. Такий підхід дозволяє раціонально використовувати енергоресурси та побічні продукти процесу, зменшуючи відходи виробництва.

1.3 Аналіз існуючих систем автоматизації виробництва етилового спирту

Основні алгоритми управління БРУ розроблені в другій половині XX століття. Основні підходи до автоматизації процесів ректифікації базуються на роботах Мандельштейна М.Л., а також підходи до автоматизації процесів ректифікації в хімічні промисловості Анісімов І.В., та ряд інших. Математичне моделювання процесів ректифікації описано Мандельштейна М.Л., Стабнікова В.Н., Ніколаєва А.П., Анісімова І.В., Бодрова В.І., Демиденко Н.Д., Кафарова В.В., Остапчука Н.В., Заворка И., Лоскутова А.Ю., Михайлова А.С, Хакена Г., Колеснікова А.А., Поспєлова Д.А., Юдицького С.А., Кононова Д.А., Герасимова В.М., Беллмана Р., Заде Л., Ротштейна А.П. та інших.

Рядом авторів запропонована реалізація адаптивної системи управління ректифікацією етилового спирту з використаннями випереджувача Сміта, де автори відзначають значне транспортне запізнення в ректифікаційній колоні по каналу відбір спирту – температура на контрольній тарілці, що необхідно подолати компенсатором. Вони розробили математичну модель об’єкта, яка входить до каналів зворотних зв’язків компенсатора.

Відомо використовування також нейронні і нечіткі регулятори. Так, приклад використання самонавчаючогося нейронного регулятора для розділу бінарної суміші. Є приклад використання нейронного регулятора для розділу 3-х компонентної суміші в ректифікаційній колоні, проведено порівняння системи з ПІ-регуляторам. Також наведено алгоритм управління БРУ на основі сценарного підходу.

На сьогоднішній день в Україні в спиртовій промисловості розповсюджені трьох колонні брагоректифікаційні установки не прямої дії, які складаються з бражної, єпюраційної та ректифікаційної колон з

дефлегматорами, конденсаторами, кип’ятильниками та з іншим додатковим обладнанням.

В наш час завдання автоматизації БРУ можна розділити на два основні складники:

– підтримання заданих параметрів установки в певному допустимому діапазоні і коригування цих параметрів у залежності від значень вхідних технологічних параметрів;

– мінімізації енерговитрат на БРУ, при допустимих регламентом втратах спирту з вторинними продуктами брагоректифікації.

Основною проблемою при управлінні брагоректифікаційною установкою є визначення джерела збурень, що займає значний відрізок часу та пов’язано з аналізом виробничої ситуації. Розроблені алгоритми управління БРУ мають низьку надійність у зв’язку з великим запізненням контрольованих параметрів.

Управління бражною колоною складається з 3-х одноконтурних систем, що здійснюють стабілізацію перегонки по таких каналах:

– витрата пари – тиск низу колони;

– витрата бражки – температура верху колони;

– витрата охолоджувальної води – температура води після водяної секції бражної колони.

Існуючі типи автоматизованих систем управління виробництвом етилового спирту можна розділити на 3 типи.

Структура САР БРУ першого типу зображена на рис. 1.3 система складається з трьох локальних систем автоматизованого регулювання, що пов’язані тільки через проміжні матеріальні потоки. За регульовані величини взяті непрямі змінні.

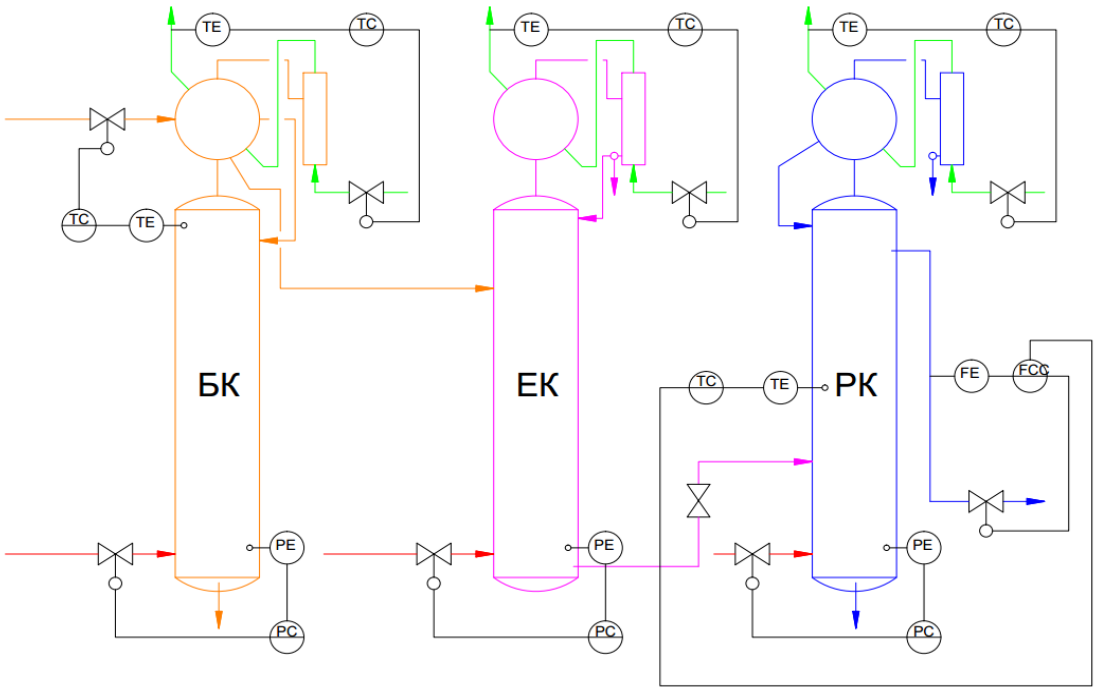


Рисунок 1.3 – Схема автоматизації БРУ першого типу [48]

Система управління епюраційною колонною складається з двох одноконтурних систем, що здійснюють стабілізацію процесу по таких каналах:

– витрата пари – тиск низу колони;

– витрата охолоджувальної води – температура води після дефлегматора епюраційної колони.

Управління ректифікаційною колоною складається з 2-х одноконтурних систем та однієї каскадної системи управління, що здійснюють стабілізацію перегонки по таких каналах:

– витрата пари – тиск низу колони;

– витрата охолоджувальної води – температура води після конденсатора та дефлегматора ректифікаційної колони;

Каскадна система управління відбору спирту-ректифікату за температурою на тарілці живлення колони, де здійснюється аналіз концентрації спирту.

Недоліками АСУ БРУ першого типу є наступне:

– оператор задає узгодженість режимів роботи колон БРУ, що негативно впливає на стабілізацію технологічного потоку;

– не враховується ступінь зв’язку множини взаємопов’язаних параметрів;

– система побудована на основі регулювання непрямих показників реакція датчиків температури та тиску суттєво запізнюються;

– високий рівень шумів та збурень;

– складний характер поведінки технологічного процесу.

Управління бражною колоною складається з 2-х одноконтурних систем та однієї каскадної системи управління, що здійснюють стабілізацію перегонки бражки по таких каналах:

– каскадна система управління витрати пари на бражну колону по температурі верху колони;

– витрата бражки;

– витрата охолоджувальної води – температура води після водяної секції бражної колони.

Структура АСУ БРУ другого типу зображена на рис. 1.4, система складається з трьох локальних систем автоматизованого регулювання, що пов’язані тільки через проміжні матеріальні потоки. За регульовані величини взяті непрямі змінні.

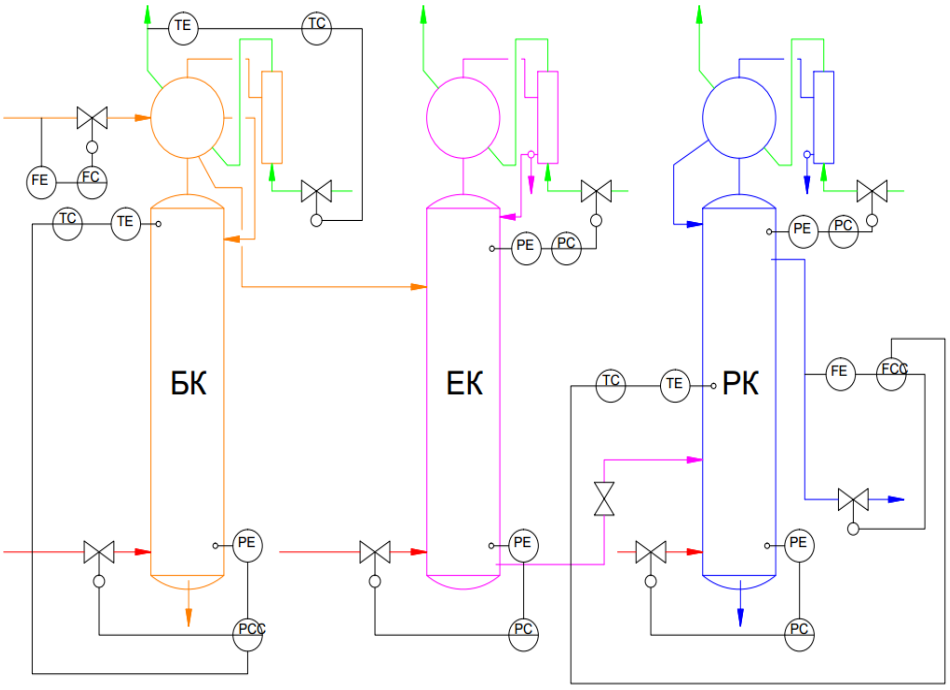


Рисунок 1.4 – Схема автоматизації БРУ другого типу [48]

Система управління епюраційною колонною складається з двох одноконтурних систем, що здійснюють стабілізацію процесу по таких каналах:

– витрата пари – тиск низу колони;

– витрата охолоджувальної води – тиск верху епюраційної колони.

Управління ректифікаційною колоною складається з 2-х одноконтурних систем та однієї каскадної системи управління, що здійснюють стабілізацію перегонки по таких каналах:

– витрата пари – тиск низу колони;

– витрата охолоджувальної води – тиск верху ректифікаційної колони;

Каскадна система управління відбору спирту-ректифікату по температурі на тарілці живлення колони, по якій здійснюється аналіз концентрації спирту.

Недоліками АСУ БРУ першого типу є те, що:

– оператор задає узгодженість режимів роботи колон БРУ, що негативно впливає на стабілізацію технологічного потоку;

– не враховується ступінь зв’язку множини взаємопов’язаних параметрів;

– не враховується інформаційний зв’язок між колонами.

Структура АСУ БРУ третього типу складається з трьох локальних систем автоматизованого регулювання, що пов’язані тільки через проміжні матеріальні потоки.

Управління бражною колоною складається з 2-х одноконтурних систем та однієї каскадної системи управління, що здійснюють стабілізацію перегонки бражки по таких каналах:

– каскадна система управління витрати пари на бражну колону по температурі верху колони;

– витрата бражки;

– витрата охолоджувальної води – температура води після водяної секції бражної колони.

Система управління епюраційною колонною складається з трьох одноконтурних систем, що здійснюють стабілізацію процесу по таких каналах:

– витрата пари – тиск низу колони;

– витрата охолоджувальної води – тиск верху епюраційної колони;

– витрата епюрату – рівень в кубі епюраційної колони.

Управління ректифікаційною колоною складається з 2-х одноконтурних систем та однієї каскадної системи управління, що здійснюють стабілізацію перегонки по таких каналах:

– витрата пари – тиск низу колони;

– витрата охолоджувальної води – тиск верху ректифікаційної колони;

– каскадна система управління відбору спирту-ректифікату по температурі на тарілці живлення колони, по якій здійснюється аналіз концентрації спирту.

Недоліками АСУ БРУ третього типу є те, що:

– оператор задає узгодженість режимів роботи колон БРУ, що негативно

впливає на стабілізацію технологічного потоку;

– не враховується інформаційний зв’язок між колонами;

– існує збурення по концентрації спирту.

Схема автоматизації БРУ третього типу наведена на рисунку 1.5.

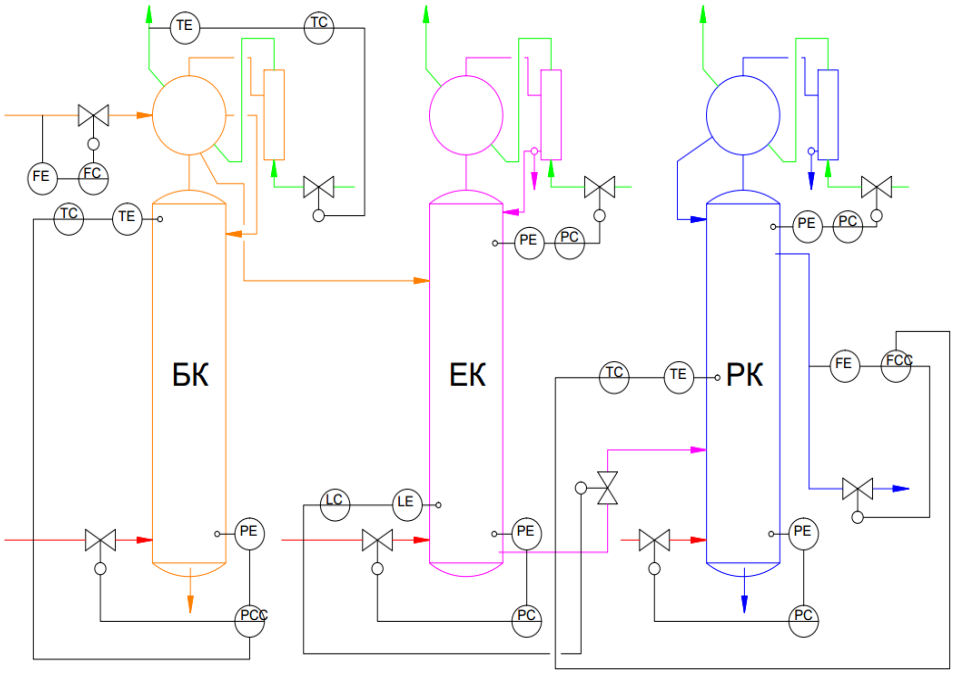


Рисунок 1.5 – Схема автоматизації БРУ третього типу [3]

Можна зробити висновок, що керування БРУ здійснюється на основі непрямих показників: тисків, витрат основних технологічних потоків, температур. Як показує досвід роботи таких АСУ, вони досить надійно реалізовують поставлені на них задачі за умови стабільної якості матеріальних потоків. Однак контури управління практично не реагують на зміну якісних показників матеріальних потоків БРУ, оскільки вимірювальні величини не чутливі до такого типу збурень. Тому

управління процесом брагоректифікації в складних конфліктних ситуаціях повністю засновано на інтуїції і досвіді оператора, який, виходячи з результатів суб'єктивних спостережень, аналізує величини температури і тиску в контрольних точках обладнання, приймає оперативні рішення по управлінню процесом. Але так як на процес постійно діють випадкові збурення, то в такому випадку є велике запізнення в контурі регулювання якості вихідного продукту. Оператор БРУ не може оперативно сприйняти і обробити цей потік інформації і прийняти оптимальне рішення по управлінню процесом: виникає так звана невизначеність у вирішенні поставленої задачі. Оператор зобов'язаний аналізувати множину інформаційних параметрів і приймати управляючі рішення інколи в умовах недостатньої інформації і дефіциту часу.

В аварійних ситуаціях оператор не здатний справитися з великим потоком інформації та часто помиляється при визначені ситуації, що виникає. Розпізнавання ситуації на рівні засобів локальної автоматики, та й навіть мікропроцесорної техніки (в програмне забезпечення, якої закладені класичні підходи до управління БРУ) не є можливою, так як необхідний аналіз параметрів системи в цілому, або її окремих функціонально – пов'язаних укрупнених частин. Все це знижує оперативність і якість прийняття рішень, робить їх багато в чому залежними від досвіду і особистих характеристик людини-оператора.

Обрана функціональна схема автоматизації БРУ базується на наступних принципах:

1. Основною проблемою брагоректифікації є отримання спирту стабільно високої якості при мінімальних витратах енергетичних ресурсів;

2. Найбільш поширеною в Україні конфігурацією БРУ є трьохколонна установка непрямої дії, що складаються з бражної, епюраційної та ректифікаційної колон з дефлегматорами, конденсаторами і допоміжним обладнанням;

3. Сучасні системи автоматизації БРУ базуються на стабілізації непрямих показників процесу (температур, тисків, витрат основних матеріальних продуктів), що надійно підтримують заданий температурний і гідродинамічний режим колон, але не можуть забезпечити стабільно високого рівня вилучення домішок у разі зміни їх складу і концентрацій у бражці та вхідного матеріального потоку. Корегування режимів роботи БРУ, у разі виникнення складних конфліктних ситуаціях, покладається на оператора;

4. Задачу отримання спирту стабільно високої якості необхідно вирішувати шляхом впровадження принципово нових підходів та алгоритмів управління БРУ для яких критерієм управління є забезпечення необхідної якості продуктів розділення колон за умови мінімальних витрат енергетичних носіїв та зменшення втрат матеріальних і фінансових ресурсів;

5. Виходячи з простоти реалізації, вимог живучості та універсальності сучасного стану технічного та програмного забезпечення систем автоматизації у спиртовому виробництві пропонується розробити нову систему управління;

6. В основу розробки алгоритмів функціонування такої системи повинна бути покладена математична модель процесу БРУ за допомогою якої, на основі інформації про якісні показники матеріальних потоків, флегмові числа кожної із колон можна розрахувати рекомендовані значення технологічних параметрів і скорегувати роботу регуляторів для забезпечення скорегованого технологічного режиму [10].

Розглянемо один із прикладів автоматизації ректифікаційної колони, що зображено на рис.1.6.

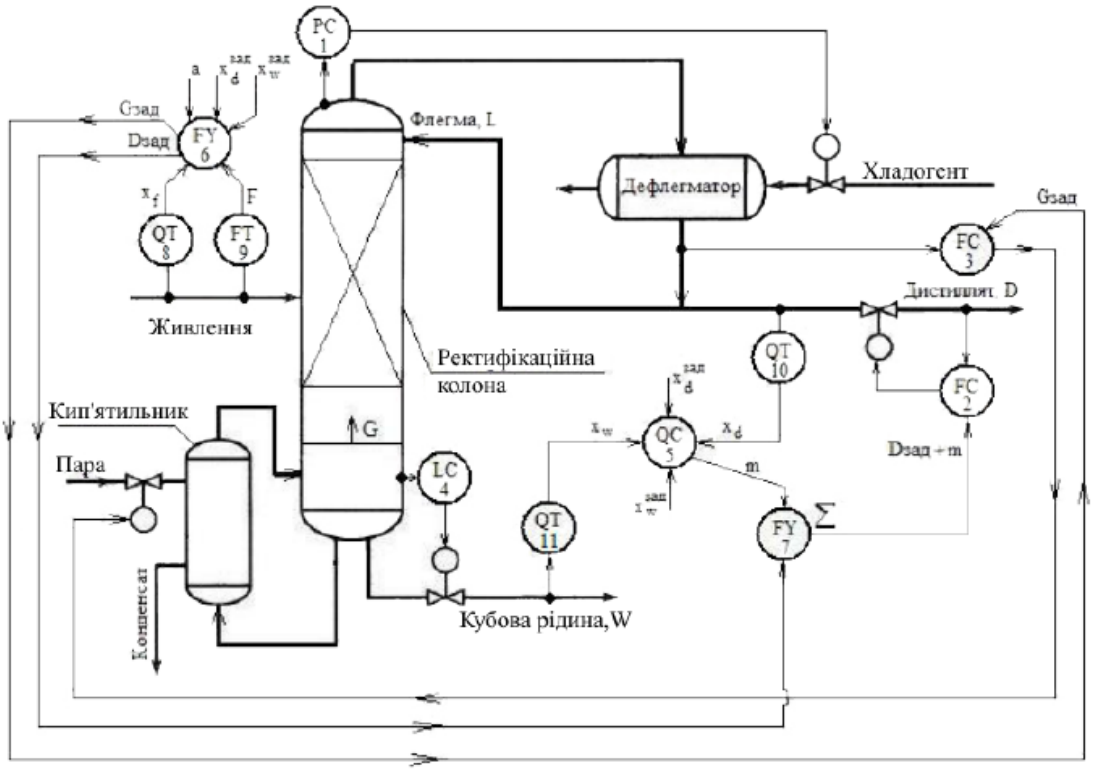


Рисунок 1.6 – Схема автоматизації процесу ректифікації суміші

До складу даної системи автоматизації входять регулятори технологічних параметрів, що працюють за відхиленням:

– регулятор тиску в колоні ректифікації зміною витрати холодоагенту, що подається в дефлегматор (поз. 1);

– регулятор витрати дистиляту (поз. 2);

– регулятор продуктивності кип'ятильника колони зміною тиску що гріє пара в сорочці кип'ятильника (поз. 3);

– регулятор рівня кубової рідини зміною витрати її вивантаження (поз. 4);

– нечіткий регулятор [7] складу дистиляту і кубової рідини зміною завдання

– регулятору витрати дистиляту (поз. 5).

Оптимізація налаштувань нечіткого регулятора, що працює в складі каскадної схеми, досягається при мінімальній сумі інтегральних квадратичних критеріїв для регулювання складу дистиляту (X_d) та кубової

рідини (X_w) за допомогою математичного моделювання перехідного процесу в системі управління. У комбіновану систему управління процесом ректифікації також входять кілька функціональних блоків:

Компенсатор впливів, що обурюють, який коригує витрату і склад живильного потоку, розраховує необхідну витрату дистиляту (D) і продуктивність кип'ятильника (G) за відповідними рівняннями і передає ці значення регуляторам витрати та продуктивності.

Акумулятор, що коригує завдання по витраті дистиляту (D) і його корекції (m), які видаються нечітким регулятором.

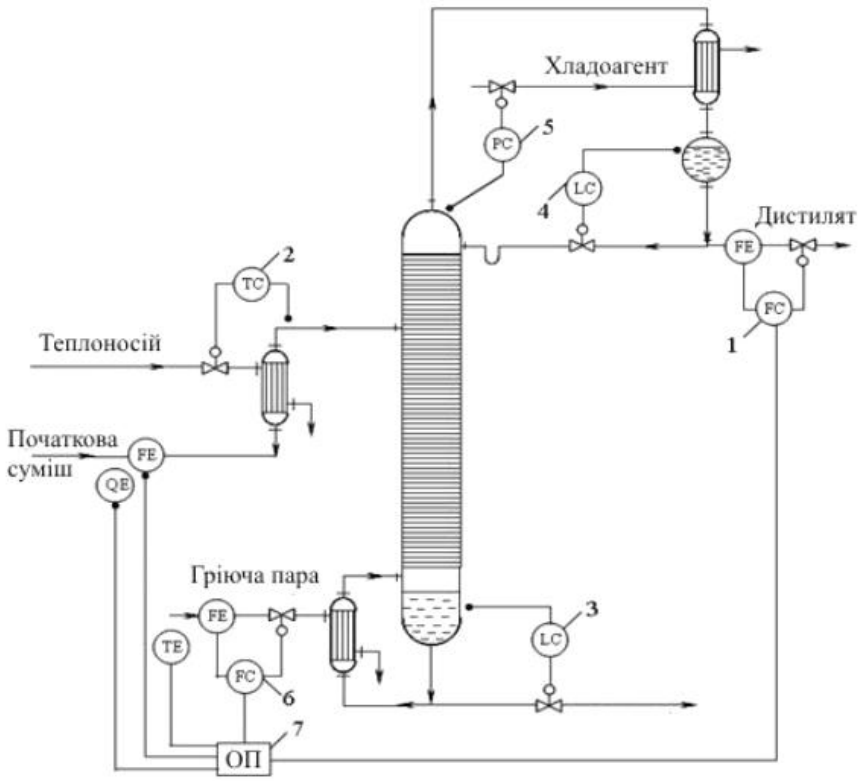
Функціональна схема автоматизації включає вимірювальні перетворювачі:

- аналізатор складу потоку живлення колони;
- витратомір потоку живлення колони;
- аналізатор складу потоку дистиляту;
- аналізатор складу потоку кубової рідини.

Розглянемо варіант автоматизації запропонований Беспаловим А.В. та Харитоновим Н.І. [8],який зображено на рис.1.7.

Ця схема є прикладом системи автоматизації, яку можна реалізувати за допомогою обчислювальної техніки. Витрати дистиляту і пари, що гріє, регулюються регуляторами, завдання яких коригуються обчислювальним пристроєм на основі витрати, складу живильного потоку та ентальпії пари, що гріє, з урахуванням динамічних характеристик колони.

Система автоматичного регулювання повинна забезпечити стабільність процесу, мінімізуючи вплив збурень. Проте наявність неконтрольованих збурень, наприклад, переохолодження флегми, може порушити режим роботи колони і призвести до відхилення складу продукту від заданого значення.



:

1,6 – регулятори витрати; 2 – регулятор температури; 3,4 – регулятори рівня; 5 – регулятор тиску; 7 – обчислювальний пристрій.

Рисунок 1.7 – Схема автоматизації процесу ректифікації суміші

1.4 Опис об’єкту автоматизації

Теплообмінні апарати є важливими компонентами більшості хімічних виробництв, оскільки вони сприяють підготовці речовин до наступних хімічних або фізичних процесів, а також допомагають стабілізувати проміжні або готові продукти. Вони виконують ключову роль у регулюванні температури, що необхідно для ефективного протікання технологічних процесів.

Холодильник-конденсатор є підвидом теплообмінних апаратів призначений для перетворення газоподібних речовин в конденсат за рахунок відбору теплоти холодоагентом. Зазвичай цей об’єкт має 2 вхідні потоки та 2 вихідні потоки.

На рисунку 1.8 наведений холодильник-конденсатор.

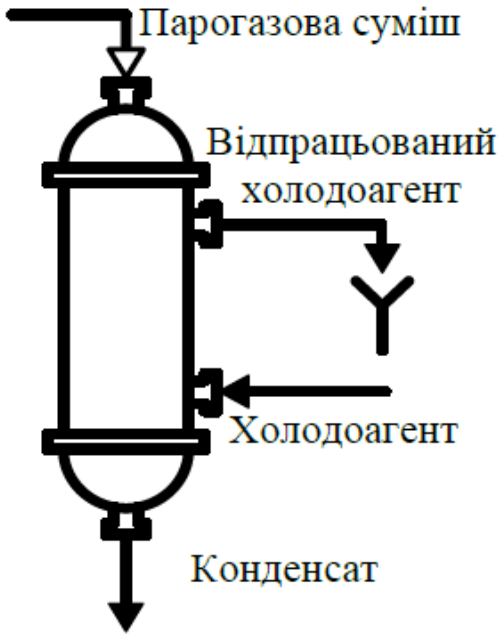


Рисунок 1.8 – Холодильник-конденсатор

Холодильник-конденсатор зазвичай має кожухотрубну конструкцію, що складається з великого циліндра, в якому розташовані трубки малого діаметру, виготовлені з матеріалів, стійких до агресивних середовищ, таких як нержавійка або мідь. Речовина, яка потребує охолодження, потрапляє в трубки, де через стінки трубок вона взаємодіє з холодоагентом, що заповнює простір навколо них.

Цей апарат є інерційним, тобто змінити його параметри займає певний час через великі розміри і об'єми речовин, які проходять через нього. Холодильник-конденсатор належить до апаратів неперервної дії, а забезпечення його стабільності та стійкості до збурень є важливою задачею в процесі керування.

Оскільки цей апарат обробляє невеликі обсяги речовин, він відноситься до малотоннажних об'єктів, але є ключовим для підготовки продукту до сепарації, що, в свою чергу, впливає на якість кінцевого продукту. Через розподілені параметри (температура і агрегатний стан змінюються в різних точках апарату) холодильник-конденсатор належить до об'єктів з розподіленими параметрами в процесах управління.

1.5 Постановка задачі

У кваліфікаційній роботі магістра розробляється система керування, спрямована на виготовлення високоякісної продукції з мінімальними витратами на виробництво. Для досягнення цієї мети ми плануємо створити високоточну математичну модель процесу конденсування етилового спирту в холодильнику-конденсаторі. Оскільки процес має складну та нелінійну (динамічну) характеристику, для розробки системи керування необхідно створити спрощену модель процесу. Ця спрощена модель повинна досить точно відтворювати результати моделювання складної початкової моделі, але при цьому забезпечувати значно менший час розрахунку.

Метою розробки проєкту є оптимізація економічних показників виробництва та підвищення якісних показників продукції за рахунок:

– створення імітаційної моделі процесу конденсування етилового спирту в холодильнику-конденсаторі;

– створення макету SCADA-системи елементів виробництва.

Розроблена система має забезпечити:

– підтримування параметрів речовин на заданому рівні;

– сигналізацію відхилення параметрі від заданого діапазону;

– аварійний захист виробництва;

– мінімізація впливу людини на перебіг процесів виробництва;

– отримання високої якості продукції.

Імітаційна модель процесу конденсування етилового спирту в холодильнику-конденсаторі має забезпечити:

1. Моделювання теплових процесів: оцінка теплових потоків, що проходять через теплообмінник, з урахуванням різниці температур між робочими речовинами (етиловий спирт, холодоагент) та їх теплової провідності.

2. Розподіл температури та концентрації: визначення температури та

концентрації етилового спирту в різних точках апарату, оскільки ці параметри можуть змінюватися в залежності від місця та часу.

3. Оцінка ефективності теплообміну: аналіз ефективності взаємодії між теплообмінним середовищем (холодоагентом) і речовиною (етиловим спиртом) через стінки трубок, щоб забезпечити максимальну ефективність конденсації.

4. Симуляція динаміки процесу: моделювання змін процесу конденсації при коливаннях параметрів (наприклад, зміни витрат, температури або складових суміші), щоб забезпечити стабільність роботи апарата.

5. Оцінка енергетичних витрат: розрахунок енергетичних потреб і втрат на різних етапах конденсації, що дозволить оптимізувати процес і знизити енергетичні витрати.

6. Аналіз впливу збурень: оцінка впливу різних збурень (наприклад, зміна складу суміші або витрат пари) на ефективність конденсації та роботу холодильника-конденсатора.

7. Прогнозування та контроль: забезпечення можливості прогнозування результатів зміни умов роботи, таких як витрати та температура, для коригування режимів і підтримання стабільності процесу.

8. Оцінка якості кінцевого продукту: моделювання впливу конденсації на чистоту та якість етилового спирту, зокрема, на відокремлення домішок і води в процесі конденсації.

Висновки. У даному розділі були розглянуті основні технології і устаткування виробництва етилового спирту. Було обрано холодильник-конденсатор, як ефективний, надійний та досить універсальний апарат для виробництва етилового спирту з етилену з акцентом на подальше очищення отриманого продукту від домішок. В даному розділі також були розглянуті важливі аспекти розробки імітаційної моделі системи керування для холодильник-конденсатор з метою виробництва високоякісної продукції з мінімальними витратами електроенергії.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Об’єкт дослідження – холодильник-конденсатор. Це технологічний апарат, що використовується для конденсування пари речовин. Він зазвичай має форму циліндра, заповненого численними трубками, виготовленими з міді або нержавіючої сталі. Пара речовин проходить через ці трубки, де охолоджується та конденсується завдяки різниці температур між середовищем усередині трубок і зовні них.

Основне завдання управління таким апаратом – підтримувати постійну температуру конденсату на виході. Для цього регулюється кількість охолоджуючої речовини (води), яка подається в міжтрубний простір.

На вхід у холодильник-конденсатор подаються пара синтезованих продуктів, що заповнює трубний простір, та охолоджуюча вода, яка надходить у міжтрубний простір для зниження температури і забезпечення процесу конденсації. На виході отримують готовий конденсат і використану охолоджуючу воду.

До вихідних потоків належать конденсат і використана холодна вода. На рис. 2.1 наведена розрахункова схема холодильника-конденсатора.

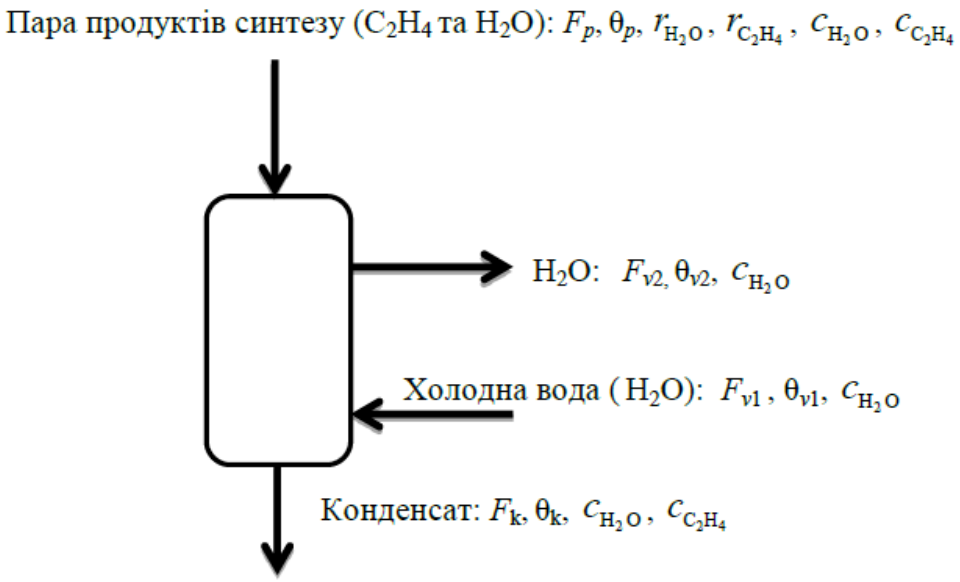


Рисунок 2.1 –Розрахункова схема холодильника-конденсатора

На основі технологічних параметрів створена спрощена структурно-параметрична схема для об'єкта керування, яка показана на рис. 2.2.

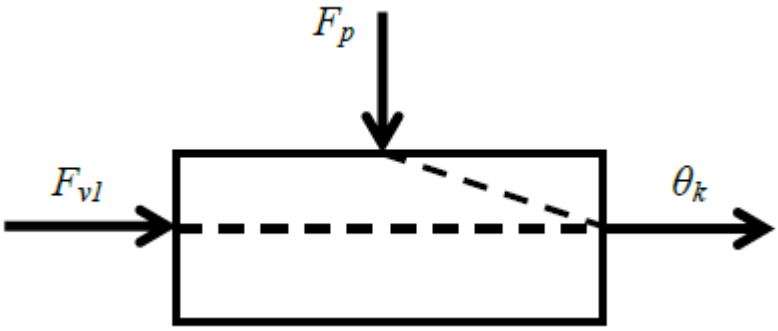


Рисунок 2.2 – Спрощена структурно-параметрична схема холодильника-конденсатора

Ця схема відображає основні елементи й параметри процесу, що дозволяють розуміти принципи роботи холодильника-конденсатора та вплив керуючих факторів. Схема містить основні вхідні та вихідні потоки, а також місця регулювання температури конденсату за допомогою змін витрати охолоджуючої води. Такий підхід допомагає спростити розуміння процесу конденсації та керування ним, виділяючи ключові параметри, які визначають ефективність роботи апарата.

Керуюча дія:

F_{v1} – масова витрата холодної води.

Регульована величина:

$\theta_к$ – температура конденсату.

Збурення:

F_p – масова витрата продуктів синтезу; θ_p,

θ_{v1} – температура продуктів синтезу, води.

Метою моделювання є визначення перехідних характеристик об'єкта для двох основних каналів впливу.

Перший канал керування пов’язаний зі зміною витрати холодної води, яка впливає на температуру конденсату: при регулюванні подачі

охолоджуючої води можна контролювати, наскільки ефективно відбувається конденсація.

Другий канал – це вплив збурень, викликаних зміною витрати продуктів синтезу, яка також впливає на температуру конденсату. Моделювання цих характеристик дозволить оцінити, як реагує система на зміни в обох каналах, і, відповідно, допоможе покращити процес управління температурою конденсату.

Основними елементами, що акумулюють тепло у холодильнику-конденсаторі, є вода, пара і метал. Для цих акумулюючих середовищ складається рівняння теплового балансу, яке описує обмін тепла між ними.

При цьому враховуються такі спрощення:

- теплові втрати в навколишнє середовище не беруться до уваги;
- молярне співвідношення водяної пари і етилену в продуктах синтезу становить 0,7;
- кількість холодної води на вході дорівнює кількості використаної води на виході;
- пара продуктів синтезу (C_2H_4 і H_2O) конденсується повністю;
- трубки як елемент, що акумулює тепло, не враховуються.

Ці припущення спрощують модель і дозволяють зосередитися на основних теплових процесах всередині холодильника-конденсатора.

В таблиці 2.1 наведені технологічні параметри для вхідних та вихідних потоків.

Таблиця 2.1 - Технологічні параметри для вхідних та вихідних потоків

Назва потоку	Позначення (ідентифікатор)	Назва параметру
Продукти синтезу (пара) (C_2H_4 та H_2O)	$F_р$	масова витрата продуктів синтезу
	$\theta_р$	температура продуктів синтезу
	c_{H2O}	питома теплоємність водяної пари
	c_{C2H4}	питома теплоємність парів етилену
	r_{H2O}	питома теплота пароутворення водяної пари
	r_{C2H4}	питома теплота пароутворення парів етилену
Холодна вода (H_2O)	F_{v1}	масова витрата холодної води
	θ_{v1}	температура холодної води
	c_v	питома теплоємність води
Використана вода (H_2O)	F_{v2}	масова витрата використаної води
	θ_{v2}	температура використаної води
	c_v	питома теплоємність води
Конденсат	$F_к$	масова витрата конденсату
	$\theta_к$	температура конденсату
	c_v	питома теплоємність води
	$c_{ет}$	питома теплоємність рідкого етилену

Відповідно до припущення про молярне співвідношення водяної пари і етилену (0,7) визначимо масові частки компонентів у відсотках:

$$\frac{\upsilon(m)}{\upsilon(\mathrm{M})} = 0{,}7, \qquad (2.1)$$

де υ – кількість речовини (моль);

m – маса речовини;

M – молярна маса.

$$\frac{\upsilon(H2O)}{\upsilon(C2H4)} = 0,7$$

$$\frac{\frac{m(H2O)}{M(H2O)}}{\frac{m(C2H4)}{M(C2H4)}} = 0,7$$

$$\frac{m(H2O)}{m(C2H4)} \cdot \frac{28}{18} = 0,7$$

$$\frac{m(H2O)}{m(C2H4)} = 0,452$$

Розв’яжемо рівняння:

$$X + 0,452X = 100\%, \qquad (2.2)$$

де маса C_2H_4 становить X, тоді маса H_2O 0,452X, а разом вони складають 100%. Отже відсотковий вміст C_2H_4 31%, а відсотковий вміст H2O 69%.

Складемо тепловий баланс для продуктів синтезу:

$$QP – Q1 – Qk = 0, \qquad (2.3)$$

Розпишемо *QP* ,*Q1* та *Qk* :

QP = FP(rH2O·0,31 + rC2H4·0,69 + θP(cH2O·0,69 + cC2H4·0,31)) – тепло, що надійшло з продуктами синтезу;

Q1 = k1·S1((θp + θk)/2 - (θv1 + θv2)/2) – тепло, що відійшло від пари до води;

$Qk = Fk \cdot(\theta k+5)(cv \cdot 0,69 + cet \cdot 0,31)$ – тепло, що відійшло з конденсатом(додаємо 5°С, тому що температура конденсату менше температури конденсації).

В розгорнутій формі тепловий баланс продуктів синтезу виглядає:

$$FP(rH2O \cdot 0,69 + rC2H4 \cdot 0,31 + \theta P(cH2O \cdot 0,69 + cC2H4 \cdot 0,31)) - k1 \cdot S1((\theta p + \theta k)/2 - (\theta v1 + \theta v2)/2) - Fk \cdot \theta k(cv \cdot 0,69 + cet \cdot 0,31) = 0 \quad (2.4)$$

Складемо тепловий баланс води:

$$Qv1 + Q1 - Qv2 = 0, \quad (2.5)$$

Розпишемо $Qv1$ та $Qv2$:

$Qv1 = Fv1 \cdot \theta v1 \cdot cv$ – тепло, що надійшло з холодною водою;
$Qv2 = Fv2 \cdot \theta v2 \cdot cv$ – тепло, що відійшло з використаною водою.

В розгорнутій формі тепловий баланс для води виглядає:

$$Fv1 \cdot \theta v1 \cdot cv + k1 \cdot S1((\theta p + \theta k)/2 - (\theta v1 + \theta v2)/2) - Fv2 \cdot \theta v2 \cdot cv = 0 \quad (2.6)$$

Щоб побудувати статичну характеристику прирівняємо рівняння 2.1 та 2.2 одне до одного та виразимо з отриманого рівняння θk.

На рис.2.3. побудована статична характеристика за каналом керування «Витрата холодної води → температура конденсату», а на рис.2.4. побудована статична характеристика за каналом збурення «Витрата продуктів синтезу → температура конденсату».

Провівши аналіз характеристик зображених на рис.2.3 та рис.2.4 можна зробити висновок, що дана модель за каналом керування та збурення є лінійною .

Розглянемо процес створення моделі динаміки каналу керування.

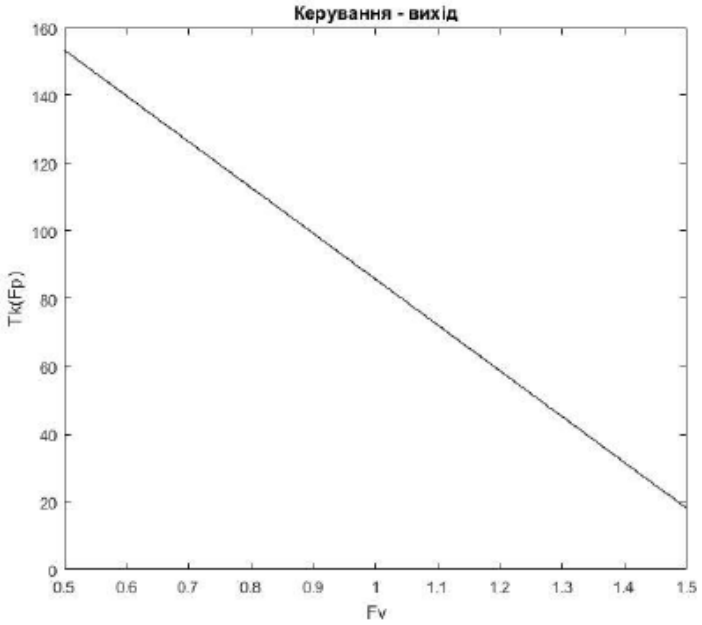


Рисунок 2.3 – Статична характеристика за каналом «Витрата холодної води → температура конденсату»

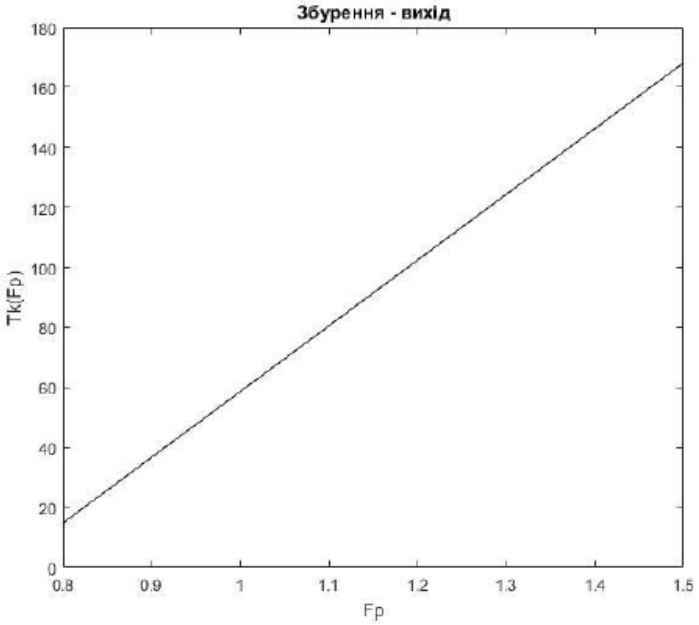


Рисунок 2.4 – Статична характеристика за каналом «Витрата продуктів синтезу → температура конденсату»

Запишемо рівняння балансу тепла у динамічному режимі для продуктів синтезу:

$$QP - Q1 - QK - Qнс = QAP, \quad (2.7)$$

де $QAP = V \cdot \rho к \ (cv \cdot 0{,}69 + cet \cdot 0{,}31)$

$\theta к / dt$ – тепло, що акумулювалося в парі;

$Qнс = kT\ San(\theta к - \theta нс)$ – тепло, що надійшло від апарату до навколишнього середовища;

kT – коефіцієнт теплопередачі;

San – площа всієї зовнішньої поверхні випарника; $\theta нс$ – температура навколишнього середовища.

У розгорнутій формі вираз для продуктів синтезу виглядає так:

$$FP(rH2O \cdot 0{,}69 + rC2H4 \cdot 0{,}31 + \theta P(cH2O \cdot 0{,}69 + cC2H4 \cdot 0{,}31)) - k1 \cdot S1((\theta p + \theta k)/2 - (\theta v1 + \theta v2)/2) - Fk \cdot (\theta k + 5)(cv \cdot 0{,}69 + cet \cdot 0{,}31) - kTSan(\theta к - \theta нс) = V \cdot \rho к \ (cv \cdot 0{,}69 + cet \cdot 0{,}31)\ d\theta к / dt$$

Динамічний режим для води:

$$Qv1 + Q1 - Qv2 = QAV, \quad (2.8)$$

В розгорнутій формі вираз для води виглядає:

$$F_{v1} \cdot \theta_{v1} \cdot c_v + k_1 \cdot S_1((\theta_p + \theta_k)/2 - (\theta_{v1} + \theta_{v2})/2) - F_{v2} \cdot \theta_{v2} \cdot c_v = V_v \cdot c_v \frac{d(\frac{\theta v1 + \theta v2}{2})}{dt}$$

Оберемо параметри, які підлягають лінеаризації: $Fp, Fк, Fv1, \theta к$.

Лінеаризація рівняння балансів (динаміки) в точці статичного режиму:

$$Fp(t) = Fp10 + \Delta Fp(t)$$
$$FK(t) = FK10 + \Delta FK(t)$$
$$\theta K(t) = \theta K10 + \Delta \theta K(t)$$
$$Fv1\ (t) = Fv110 + \Delta Fv1(t)$$

Визначимо *Q1* з рівняння (2.2) та підставимо у (2.1), отримаємо наступне рівняння:

$$QP - (- Qv1 + Qv2\ ) - Qk = QAP$$

Запишемо вираз в розгорнутій формі:

$$F_P(r_{H2O}\cdot 0{,}69 + r_{C2H4}\cdot 0{,}31 + \theta_P(c_{H2O}\cdot 0{,}69 + c_{C2H4}\cdot 0{,}31)) - (- F_{v1}\cdot\theta_{v1}\cdot c_v +$$
$$+ F_{v2}\cdot\theta_{v2}\cdot c_v) - F_k\cdot(\theta_k+5)(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31) = V\cdot\rho_к\,(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31)\frac{d\theta к}{dt}$$

Скорочуємо вираз згідно допущень:

$$F_P(r_{H2O}\cdot 0{,}69 + r_{C2H4}\cdot 0{,}31 + \theta_P(c_{H2O}\cdot 0{,}69 + c_{C2H4}\cdot 0{,}31)) + F_{v1}\cdot(\theta_{v1}\cdot c_v -$$
$$- \theta_{v2}\cdot c_v) - F_k\cdot(\theta_k+5)(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31) = V\cdot\rho_к\,(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31)\frac{d\theta к}{dt}$$

Рівняння після лінеаризації вказаних змінних має вигляд:

$$\Delta F_P(r_{H2O}\cdot 0{,}69 + r_{C2H4}\cdot 0{,}31 + \theta_P(c_{H2O}\cdot 0{,}69 + c_{C2H4}\cdot 0{,}31)) + \Delta F_{v1}\cdot(\theta_{v1}\cdot c_v -$$
$$- \theta_{v2}\cdot c_v) - \Delta F_k\cdot(\theta_k+5)(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31) - \Delta\,\theta_k F_k\cdot(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31) =$$
$$= V\cdot\rho_к\,(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31)\frac{d\theta к}{dt}$$

Для зручності запису введемо коефіцієнти:

$$К1 = (r_{H2O}\cdot 0{,}69 + r_{C2H4}\cdot 0{,}31 + \theta_P(c_{H2O}\cdot 0{,}69 + c_{C2H4}\cdot 0{,}31))$$

$$К2 = (\theta_{v1}\cdot c_v - \theta_{v2}\cdot c_v)$$

$$К3 = (\theta_k + 5)(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31)$$

$$К4 = F_k\cdot(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31)$$

$$К5 = V\cdot\rho_к\,(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31)$$

Отримаємо рівняння:

$$\Delta F_P\cdot К1 + \Delta F_{v1}\cdot К2 - \Delta F_k\cdot К3 - \Delta\,\theta_k\cdot К4 = К5\frac{d\theta к}{dt}$$

Запишемо лінеаризовані рівняння математичної моделі в просторі змінних стану:

$$\Delta F_k(t)\cdot К3 + \Delta\,\theta_k(t)\cdot К4 = -\Delta F_P(t)\cdot К1 - \Delta F_{v1}(t)\cdot К2 - К5\frac{d\theta к}{dt}$$

Рівняння після лінеаризації вказаних змінних:

$$\Delta F_P(r_{H2O}\cdot 0{,}69 + r_{C2H4}\cdot 0{,}31 + \theta_P(c_{H2O}\cdot 0{,}69 + c_{C2H4}\cdot 0{,}31)) + (\Delta F_{v1}\cdot(\theta_{v1}\cdot c_v - \theta_{v2}\cdot c_v)) - \Delta F_k\cdot\theta_k(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31) - \Delta\,\theta_k(F_k\cdot(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31) - k_T S_{an}) = V\cdot\rho_к\,(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31)\frac{d\theta к}{dt}$$

Введемо коефіцієнт:

$$К6 = (F_k\cdot(c_v\cdot 0{,}69 + c_{et}\cdot 0{,}31) - k_T S_{an})$$

Отримаємо рівняння:

$$\Delta F_P\cdot К1 + \Delta F_{v1}\cdot К2 - \Delta F_k\cdot К3 - \Delta\,\theta_k\cdot К6 = К5\frac{d\theta к}{dt}$$

Перевіремо ТОК на керованість.

Маємо рівняння динаміки 3.3 в приростах:

$$\Delta F_k(t)\cdot К3 + \Delta\,\theta_k(t)\cdot К4 = -\Delta F_P(t)\cdot К1 - \Delta F_{v1}(t)\cdot К2 - К5\frac{d\theta к}{dt}$$

Теорема Калмана для лінійного стаціонарного процесу:

$$\dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + B\bar{u}(t)$$

де А – матриця системи;

В – матриця входу;

x(t) – параметри стану;

u(t) – керовані величини.

$$А=|К3 \quad К4| \quad В=|-К1|$$

За теоремою Калмана маємо:

$$К = [В \quad А\cdot В]$$

$$Rank\ К = 1$$

Отже, за теоремою Калмана ранг матриці К дорівнює 1, це означає що об’єкт, який описується рівнянням (2.3) є абсолютно керованим, оскільки ранг матриці дорівнює кількості регульованих величин (в нашому випадку $\Delta\theta_к$- це регульована величина).

Розглянемо математичну модель в області зображень.

Після перетворенням за Лапласом змінної часу t → p:

$$\Delta F_p(t) \rightarrow F_p(p),$$

$$\Delta F_{v1}(t) \rightarrow F_{v1}(p),$$

$$\Delta F_k(t) \rightarrow F_k(p),$$

$$\Delta\theta_k(t) \rightarrow \theta_k(p).$$

Перетворимо за Лапласом лінеаризоване рівняння (2.3):

$$Fk\,(p)\cdot К3 + \theta k(p)\cdot К4 + p\,\theta k(p)\cdot К5 = -FP(p)\cdot К1 - Fv1\,(p)\cdot К2$$
$$Fk\,(p)\cdot К3 + \theta k(p)(К4 + p\cdot К5) = -FP(p)\cdot К1 - Fv1\,(p)\cdot К2$$

Перетворимо за Лапласом лінеаризоване рівняння (3.4):

$$Fk(p)\cdot К3 + \theta k(p)\cdot К6 + p\,\theta k(p)\cdot К5 = -FP(p)\cdot К1 - Fv1\,(p)\cdot К2$$
$$Fk\,(p)\cdot К3 + \theta k(p)(К6 + p\cdot К5) = -FP(p)\cdot К1 - Fv1\,(p)\cdot К2$$

Запишемо передавальні функції ТОК за каналами керування та збурення:

1. Передавальна функція за каналом керування «Масова витрата холодної води – Температура конденсату» має вигляд:

Передавальна функція за каналом керування $Fv1 \rightarrow \theta к$:

$$W_{кер}(p) = \theta_к(p) / F_{v1}(p)$$

$$W_{кер}(p) = \frac{-\frac{К1}{К6}}{\frac{К5}{К6}p + 1}$$

$$W_{кер}(p) = \frac{-97{,}48}{332{,}6p + 1}, \qquad (2.9)$$

2. Передавальна функція за каналом збурення «Масова витрата продуктів синтезу – Температура конденсату» має вигляд:

Передавальна функція за каналом збурення $Fp \rightarrow \theta к$:

$$W_{зб2}(p) = F_p\,(p) / F_{v1}(p)$$

$$W_{зб2}(p) = \frac{-\frac{K2}{K6}}{\frac{K5}{K6}p+1}$$

$$W_{зб2}(\text{р}) = \frac{60{,}25}{332{,}6\text{р}+1}, \qquad (2.10)$$

За каналом керування «Витрата холодної води → температура конденсату» отримано перехідну характеристику, що зображена на рис.2.5:

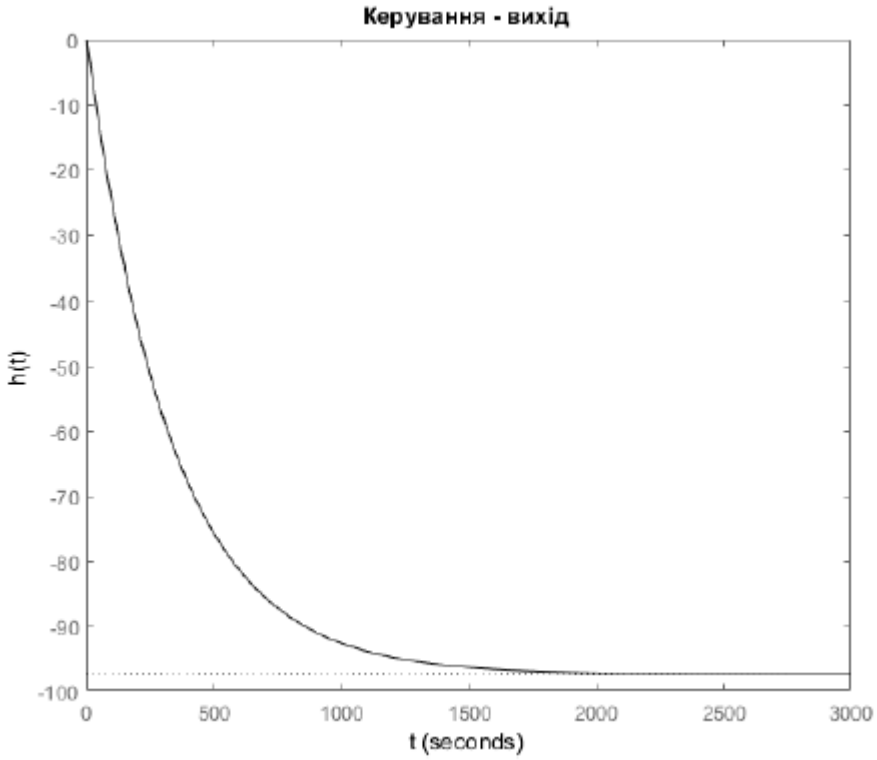


Рисунок 2.5 – Перехідна характеристика ТОК за каналом «Витрата холодної води → температура конденсату»

За каналом збурення «Витрата продуктів синтезу → температура конденсату» отримано перехідну характеристику, що зображена на рис.2.6:

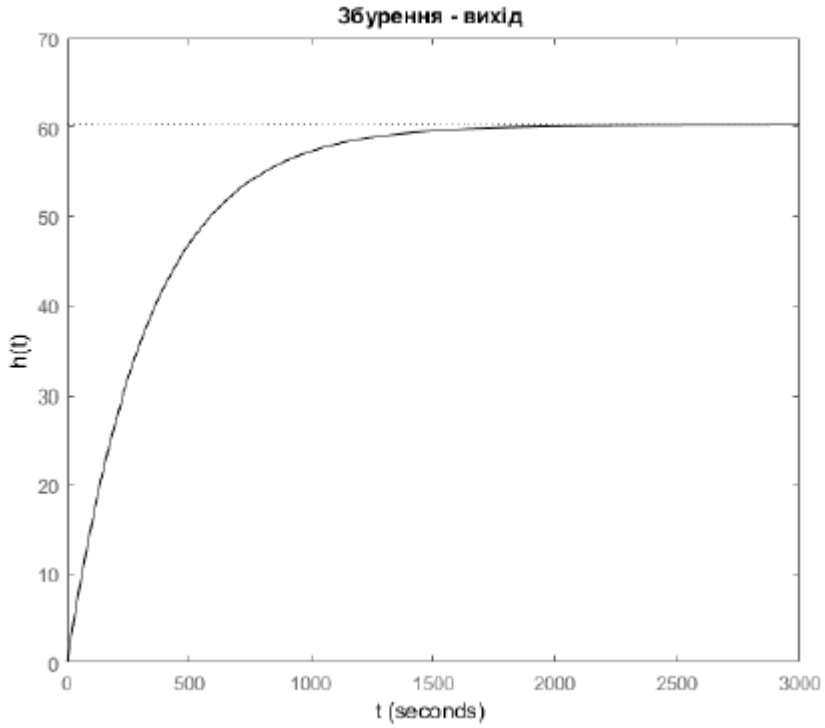


Рисунок 2.6 – Перехідна характеристика ТОК за каналом «Витрата продуктів синтезу → температура конденсату»

Оскільки дана модель не розглядає довжину трубопроводів від виконуючого механізма каналу керування до ТОК, що вводить певне транспортне запізнення в систему, то його потрібно розрахувати:

R = 80 мм – радіус трубопровода;

Fv = 1,6 кг/с – масова витрата води;

ρ = 997 кг/м^3 – густина;

L = 12,25 м – довжина трубопроводу.

Об’ємна витрата:

$Fo = Fv$ / ρ = 0,0016 м^3/с

Площа перерізу трубопровода:

$S = \pi R2$ = 0,0064 м^2

Швидкість руху води по трубопроводу:

ν = Fo / S = 0,25 м/с

Транспортне запізнення:

τ = L ν = 49 с

Для того щоб додати транспортне запізнення скористаємося програмним засобом *MatLab*:

```
s = tf('s');
Wo = -97.48 / (332.6*s + 1);
set(Wo,'inputdelay',49);
```

Та отримаємо нову передавальну функцію ооб'єкта за каналом керування:

$$W_o = \exp(-49 \cdot s) = \frac{-97{,}48}{332{,}6p + 1}, \qquad (2.11)$$

На рис.2.7. зображено перехідну характеристику об'єкта за каналом керування «Витрата холодної води → температура конденсату» з отриманим транспортним запізненням.

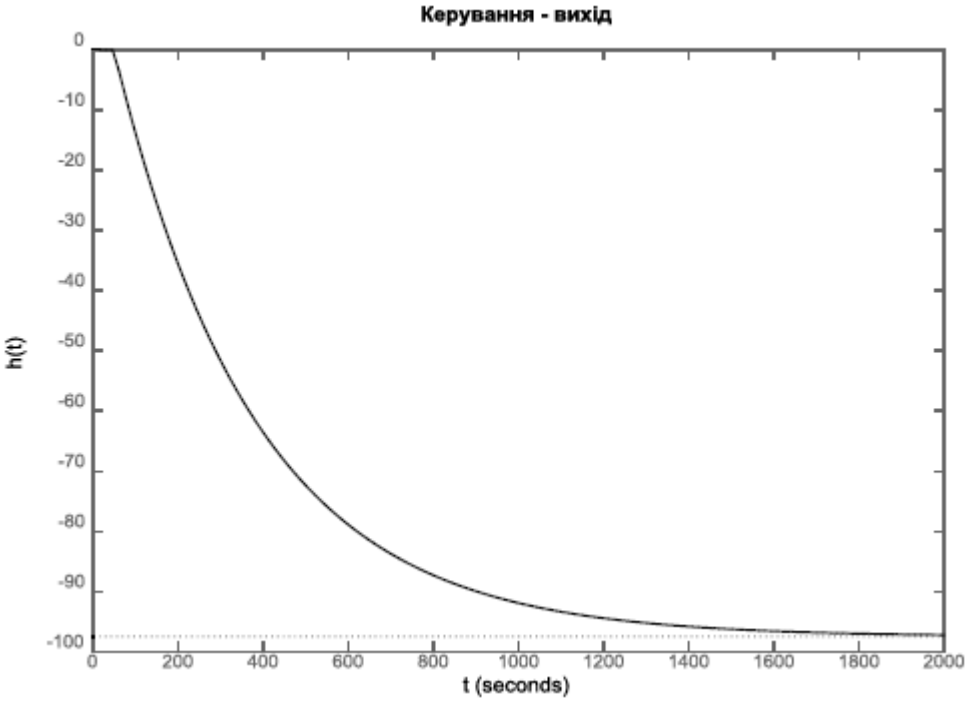


Рисунок 2.7 – Перехідна характеристика ТОК за каналом «Витрата холодної води →температура конденсату» з транспортним запізненням

Висновки. У цьому розділі була розроблена математична модель для технологічного об'єкта – холодильника-конденсатора. Досліджувалися його статичні та динамічні режими роботи, а також були виведені передатні функції для керуючого каналу та каналу збурення. На основі цих

передатних функцій побудовано перехідні характеристики, які описують поведінку системи за різних умов. У подальших етапах ці передатні функції будуть використані для синтезу системи керування холодильником-конденсатором, що дозволить забезпечити ефективне регулювання його роботи.

3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Розроблення плану експерименту

Система дослідження дозволяє формувати різноманітні керуючі впливи і подавати їх на підсистему керування холодильника-конденсатора. Об'єкт керування не накладає обмежень на керуючі впливи, тому можливо досліджувати його за допомогою методу активного експерименту.

З метою проведення ідентифікації об'єкта керування за допомогою методу активного експерименту необхідно отримати його динамічну характеристику, дані для побудови статичної характеристики, характеристику при обраному керуючому впливі, а також перевірочні дані. Це дозволить визначити основні параметри та зв'язки системи, що стане основою для подальшого налаштування і оптимізації системи керування.

Розроблено план експерименту:

1. Налаштування системи дослідження:

– перевірити налаштування приладів вимірювання;

– переконатися у правильному з'єднанні обладнання;

– підготувати програмне забезпечення для реєстрації даних.

2. Отримання динамічної характеристики:

– установити керуючий сигнал на мінімальне значення та досягти усталеного режиму;

– запустити процес реєстрації;

– збільшити керуючий сигнал до максимального значення та досягти усталеного режиму.

3. Зупинити процес реєстрації.

Отримання даних для побудови статичної характеристики:

– установити керуючий сигнал на мінімальне значення та досягти

– усталеного режиму;

– запустити процес реєстрації;

– послідовно змінювати керуючий сигнал на рівні 20%, 40%, 60%, 80% та 100% і досягти усталеного режиму після кожної зміни;

– зупинити процес реєстрації.

4. Отримання даних при П-образному впливі:

– установити керуючий сигнал на мінімальне значення та досягти усталеного режиму;

– запустити процес реєстрації;

– збільшити керуючий сигнал до максимального значення та досягти усталеного режиму;

– зменшити керуючий сигнал до мінімального значення та досягти усталеного режиму;

– зупинити процес реєстрації.

5. Отримання перевірочних даних:

– установити керуючий сигнал на мінімальне значення та досягти усталеного режиму;

– налаштувати псевдовипадковий керуючий вплив;

– запустити процес реєстрації;

– зупинити процес реєстрації після упродовж часу, еквівалентного десяти перехідним процесам;

– завершити експериментальний процес.

3.2 Реалізація експерименту і результати моделювання

Для синтезу системи керування теплообмінними апаратами було обрано об’єкти: холодильник-конденсатор.

Холодильник-конденсатор буде досліджено за допомогою програмного засобу MatLab та його підпрограм:

– PID Tuner;

– SisoTool.

Раніше було розроблено модель холодильника-конденсатора та отримано його передавальну функцію:

$$W_o = \frac{-97{,}48}{332{,}6p + 1}$$

На рисунку 3.1 наведено контур керування холодильника-конденсатора за каналом «Витрата холодної води → температура конденсату» з ПІД-регулятором, для якого потрібно підібрати оптимальні налаштування.

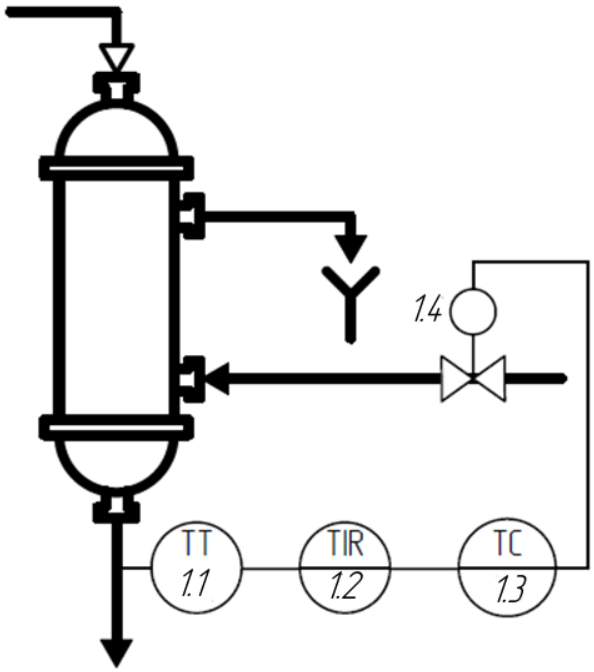


Рисунок 3.1 – Схема автоматичного керування холодильника-конденсатора

Метод М-кола – це підхід до налаштування замкненої системи автоматичного регулювання, який забезпечує відповідність певному показнику коливання. Цей показник визначає співвідношення між швидкодією системи та її стійкістю. Якщо система налаштована таким чином, що її амплітудно-фазова характеристика (АФХ) у розімкненому

стані торкається відповідного М-кола, то замкнена система матиме заданий запас по амплітуді та фазі.

Метод М-кола дозволяє враховувати як динамічні характеристики системи, так і вимоги до її стійкості. Він є особливо зручним у випадках, коли система працює в умовах великих навантажень або має складну структуру.

Під час практичної реалізації методу зазвичай виконують наступні етапи:

– аналіз АФХ розімкненої системи;

– побудова М-кіл на комплексній площині частотних характеристик;

– налаштування параметрів регулятора так, щоб АФХ торкалася вибраного М-кола.

Цей метод застосовується для систем регулювання, де важливим є забезпечення точності, надійності та мінімального часу реакції на зміни вхідного сигналу.

Особливості методу М-кола:

1. Чим більше значення М, тим швидше система реагує на зовнішні впливи або збурення. Однак із зростанням М підвищується ризик слабко затухаючих коливань, що може вплинути на стабільність.

2. Для забезпечення оптимальної роботи систем в умовах хімічної промисловості рекомендується вибирати М у діапазоні $1{,}1 \leq M \geq 1{,}4$. Такий діапазон забезпечує баланс між швидкодією системи і її стабільністю.

3. Для налаштування системи методом М-кола використовують спеціальну функцію, у якій заздалегідь задається потрібний показник М. Наприклад, якщо вибрано $M=1{,}3$. Це забезпечує помірний рівень швидкодії з достатнім запасом стійкості.

Для налаштування регулятора методом М-кола використаємо наступну функцію в якій відразу задаємо потрібний показник коливності $M = 1{,}3$:

```
function Wr=mkolo(Wo,Kr,Ti)
M = 1.3;
Xdk=-M*M/(M*M-1);
Rk=M/(M*M-1);
Xk=(Xdk-Rk):(Rk/32):(Xdk+Rk);
Yk=(Rk^2-(Xk-Xdk).^2).^0.5;
fn=300;
Wr=tf([Kr*Ti Kr*1],[Ti 0]);
W=Wo*Wr;
f=logspace(-4,4,fn);
W=frd(W,f);
[af,]=frdata(W);
af=squeeze(af);
ii=0;
afv=0;
for i=1:fn
if abs(imag(af(i)))<(1.3*Rk)
ii=ii+1;
afv(ii)=af(i);
end
end
re=real(afv);
im=imag(afv);
plot(re,im,'k',Xk,Yk,'k',Xk,-Yk,'k'), grid on
end
```

Задаємо передавальну функцію за каналом керування «Витрата холодної води → температура конденсату» та параметри ПІ-регулятора:

```
s = tf('s');
Wo = -97.48 / (332.6*s + 1);
set(Wo,'inputdelay',49);
```

```
Ti = -114.5;
Kr = 0.00205;
figure (3), mkolo(Wo,Kr,Ti);
```

Аналіз отриманих графічних данних надав значення Ti та Kr. АФХ дотична до побудованого М-кола. З рисунку 3.2 отримано наступні параметри:

Ti = -114,5

Kr = 0,00205

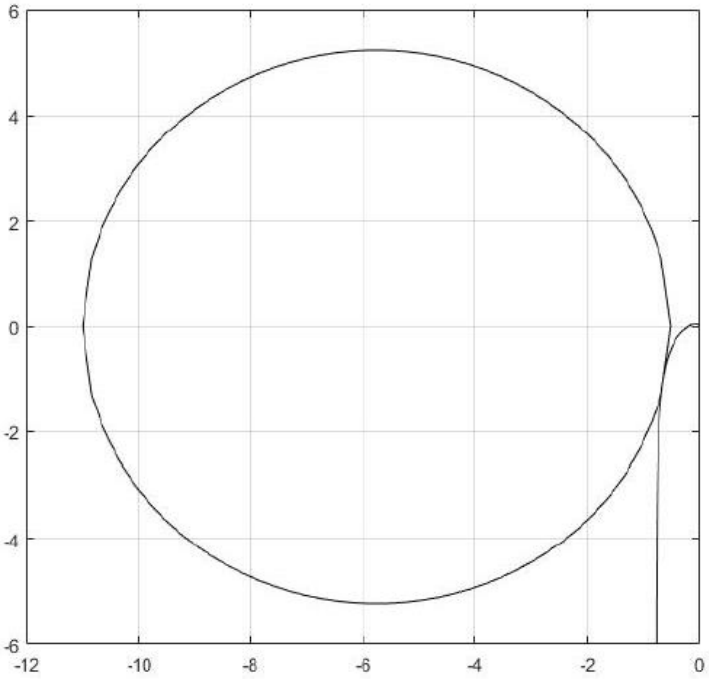


Рисунок 3.2 – Налаштування ПІ-регулятора методом М-кола

На рис. 3.3 наведена перехідна характеристика системи для каналу керування «Витрата холодної води → температура конденсату», де використано ПІ-регулятор, налаштований методом М-кола. Аналіз отриманих результатів показав, що таке налаштування не є оптимальним. Причини цього висновку полягають у наступному:

– на виході системи спостерігається значне перерегулювання;

– усталене значення змінюється недостатньо, що свідчить про низьку ефективність керування за таких параметрів.

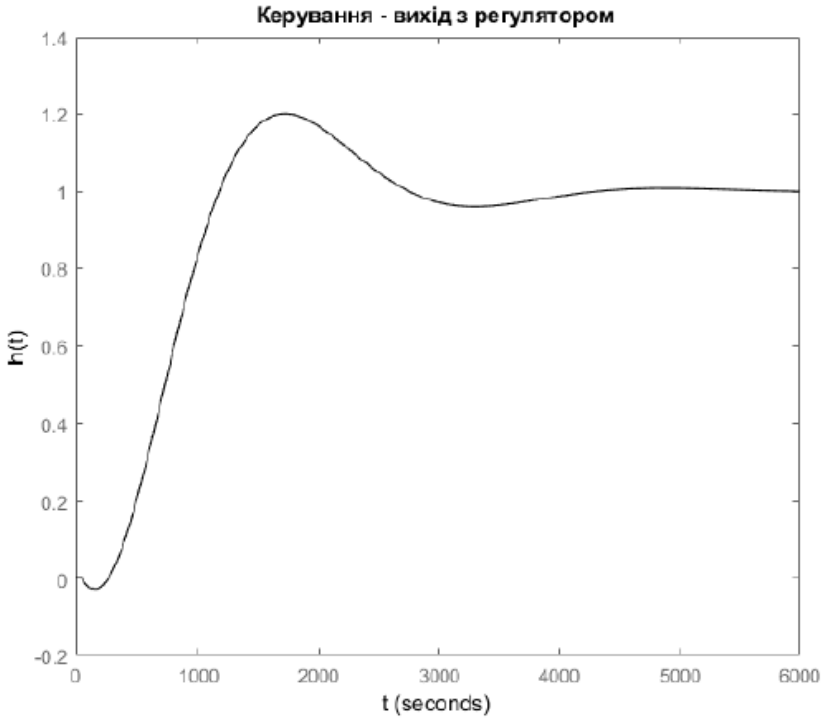


Рисунок 3.3 – Перехідні характеристика з ПІ-регулятором налаштованим методом М-кола

Висновки. Амплітудно-фазова характеристика системи (АФХ) є дотичною до побудованого М-кола, що підтверджує виконання умов методу налаштування. Однак отримані параметри не забезпечують достатньої точності та стійкості системи. Для досягнення кращих характеристик системи необхідно провести додаткову оптимізацію параметрів регулятора. Це може включати підбір інших значень Ti та Kr, а також повторне тестування системи на стійкість і швидкодію. Важливо зменшити перерегулювання та забезпечити адекватну зміну вихідного сигналу до усталеного значення.

4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ І РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

4.1 Синтез системи керування в програмному модулі SISOTool

Програмний модуль SISOTool використовується для розробки і налаштування регуляторів (коригувальних пристроїв) і пристроїв прямого зв'язку в системах автоматичного керування. Він надає зручний інструмент для вирішення задач синтезу регулятора, дозволяючи інтерактивно моделювати і коригувати параметри системи.

У SISOTool можна вибрати тип регулятора, який найкраще підходить для конкретного об'єкта управління, а також задати спосіб налаштування його параметрів, таких як посилення, постійна часу тощо.

Для початку роботи задається передатна функція об'єкта управління в потрібній математичній формі. Після цього активується інтерактивне середовище SISOTool, яке дозволяє візуально аналізувати динамічні властивості системи, налаштовувати регулятор і спостерігати, як зміни параметрів впливають на перехідний процес, стійкість і частотні характеристики. Цей підхід значно полегшує процес оптимізації регулятора, оскільки дозволяє миттєво бачити результати змін і підбирати оптимальні параметри для забезпечення необхідної якості управління.

```
>> s = tf('s');
>>Wo = -97.48 / (332.6*s + 1);
>>set(Wo,'inputdelay',49);
>> Wo
Wo =
                  - 97.48
  exp(-49*s) * ----------------
                  332.6 s + 1
Continuous-time transfer function
>> sisotool(Wo);
```

Вікно редактора приведене на рис.4.1, з архітектурою системи, із закладками, що відкривають різноманітні налаштування, де обирано архітектуру системи, що зображено на рис.4.2.

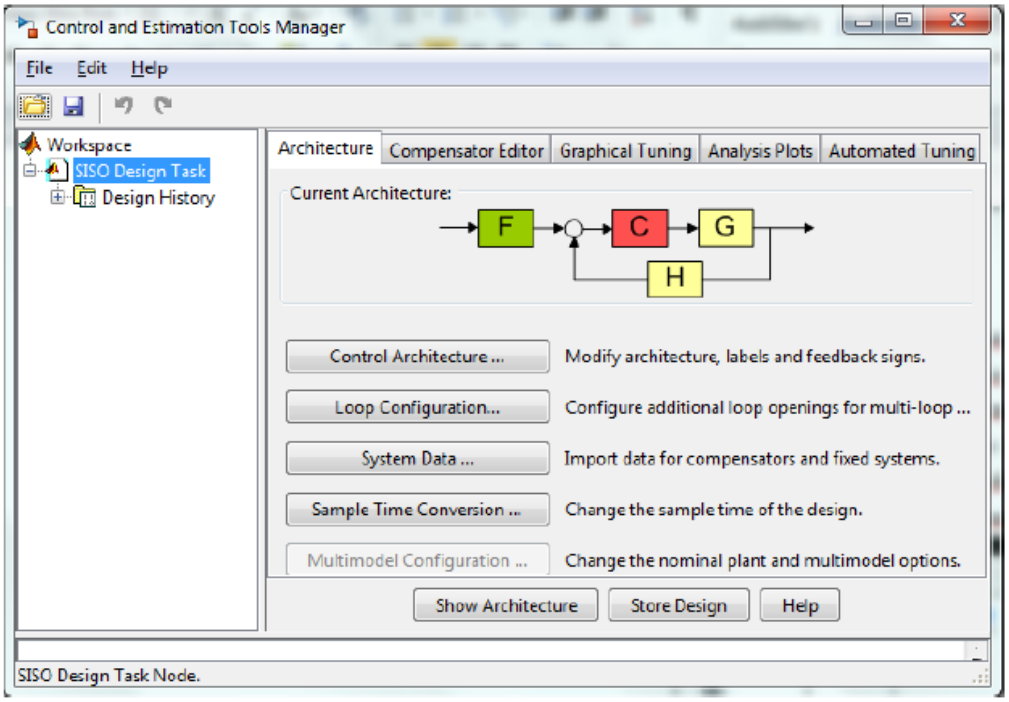
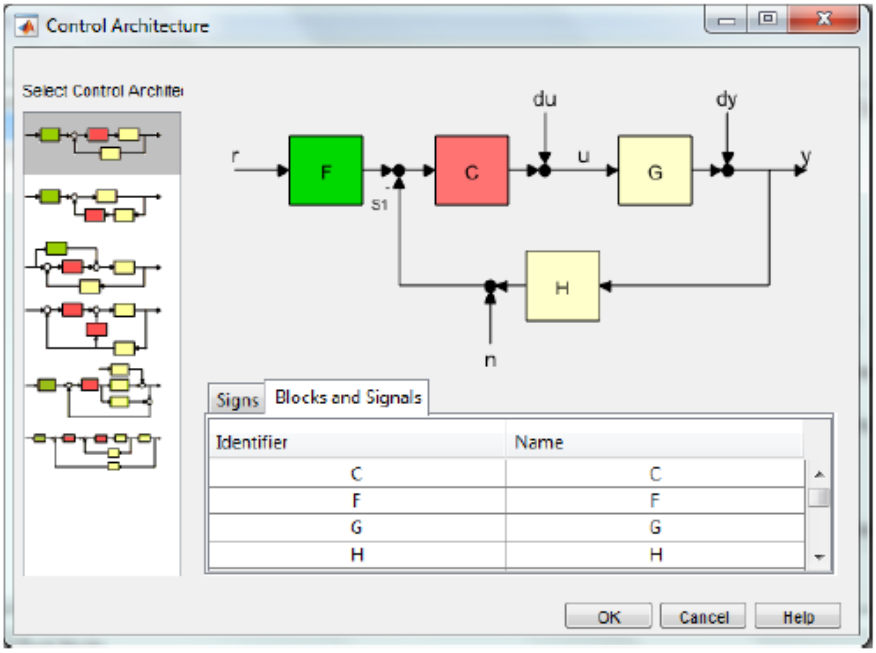


Рисунок 4.1 – Вікно редактора



G – plant (математична модель об’єкта); H – sensordynamics (давач, що вимірює вихідну величину); F – prefilter (фільтр); C – compensator (регулятор)

Рисунок 4.2 – Архітектура системи

Обираємо потрібні налаштування для підбору налаштувань регулятора, його тип, критерій налаштування у вікні зображеному на рис.4.3.

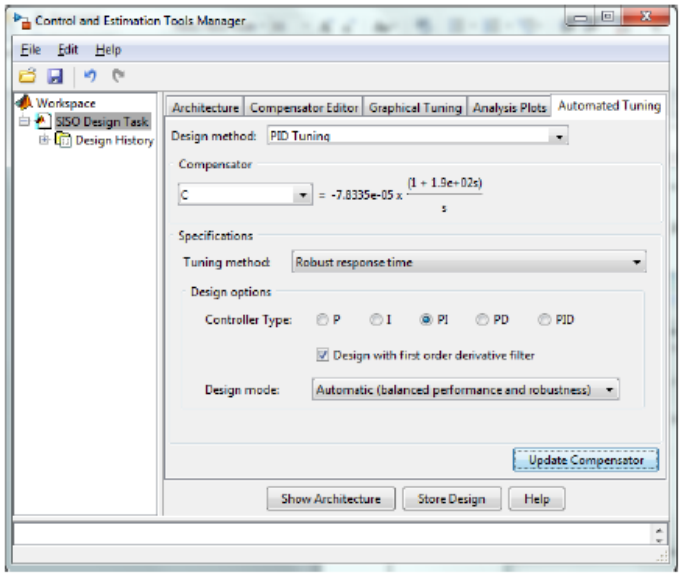


Рисунок 4.3 – Вікно налаштування регулятора

Перехідна характеристику системи з П-регулятором наведена на рисунку 4.4. Застосування П-регулятора є не доцільним оскільки є недорегулювання становить близько 17%.

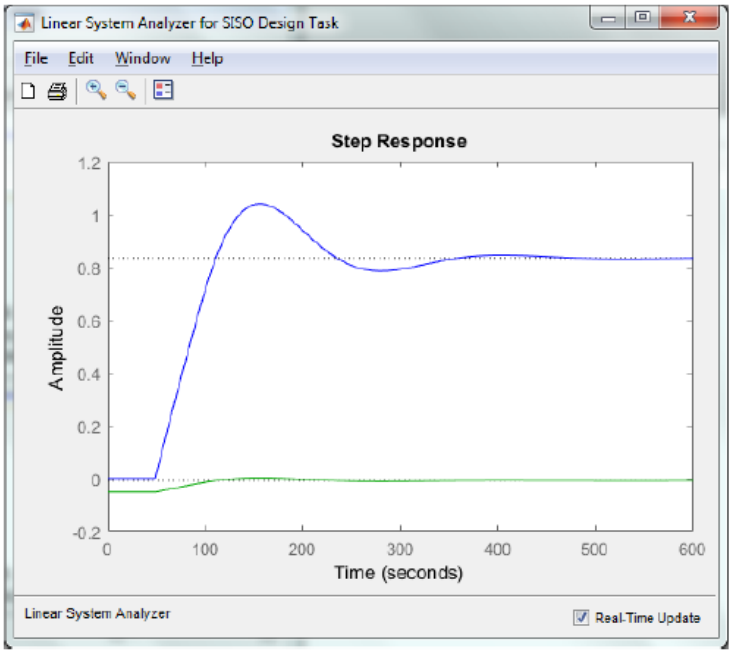


Рисунок 4.4 – Реакція налаштованої системи з П-регулятором на сходинковий сигнал

На рисунку 4.5. наведено перехідну характеристику системи з ПІ-регулятором, на рис.4.6. з ПІД.

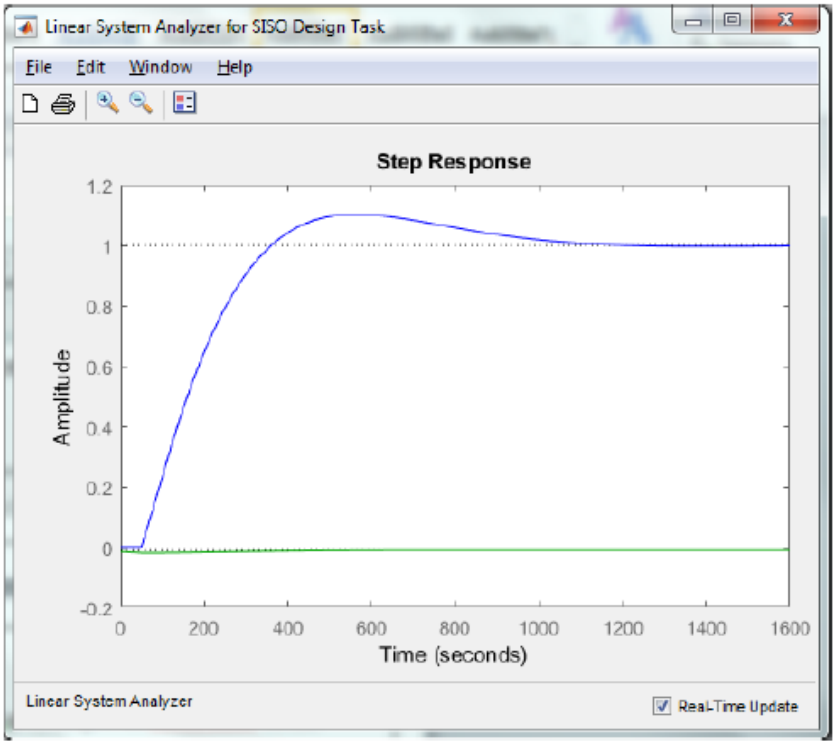


Рисунок 4.5 – Реакція налаштованої системи з ПІ-регулятором на сходинковий сигнал

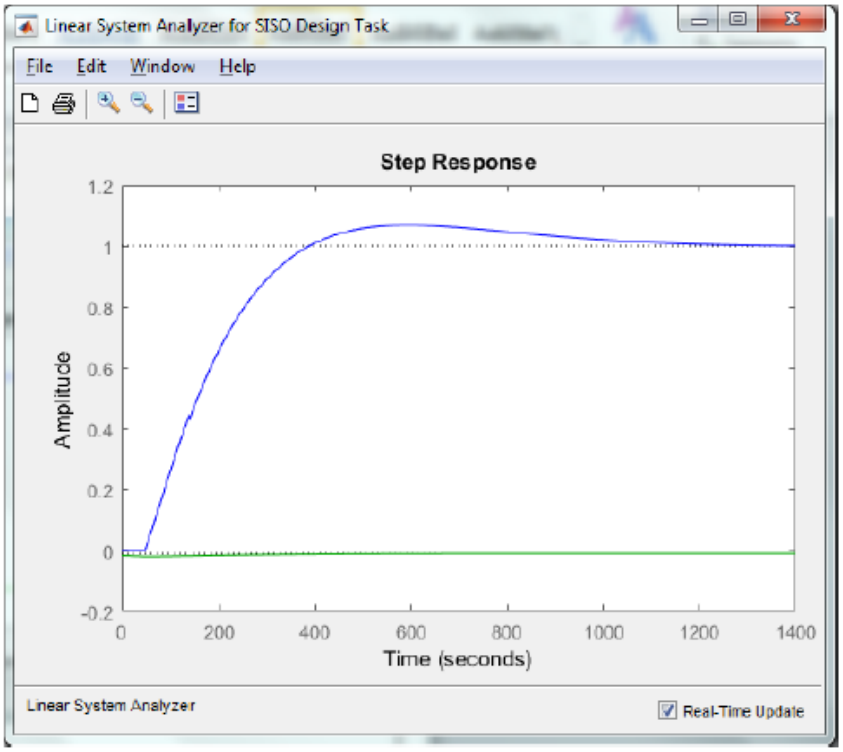


Рисунок 4.6 – Реакція налаштованої системи з ПІД-регулятором на сходинковий сигнал

За допомогою функції Export виводимо значення ПІ- та ПІД-регуляторів оскільки їх налаштовані системи являються прийнятними для нашої системи в робочий простір MatLab:

```
Cpi =

  -0.015002 (s+0.005222)
  ----------------------
          s

Continuous-time zero/pole/gain model.

>> Cpid

Cpid =

  -0.016358 (s+0.005355) (s+0.005304)
  -----------------------------------
          s (s+0.006369)

Continuous-time zero/pole/gain model.
```

На рис.4.7. побудовано замкнуті системи ПІ- та ПІД-регуляторів для порівняння.

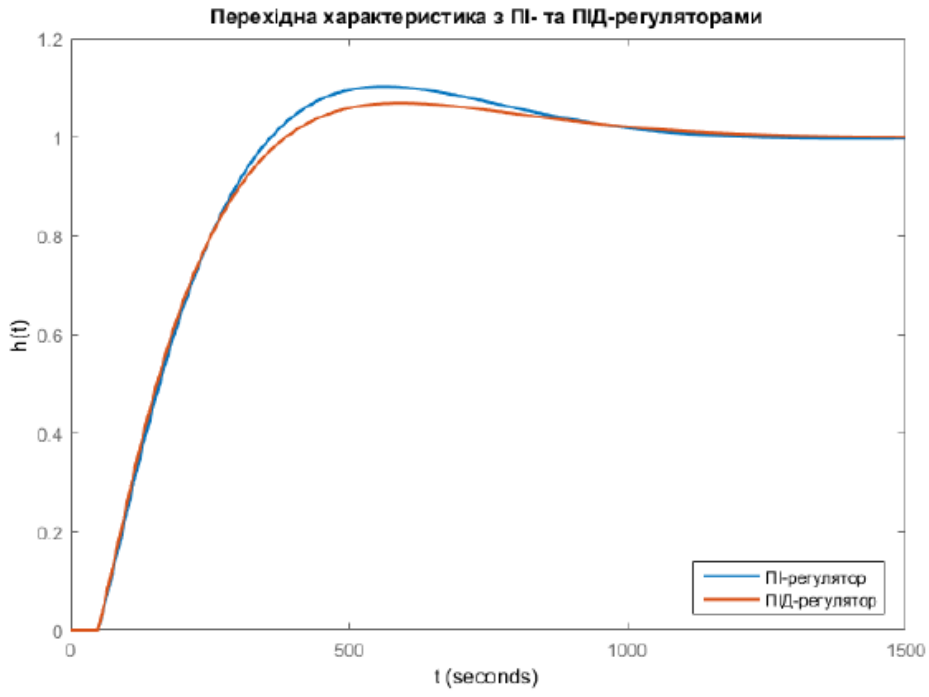


Рисунок 4.7 – Замкнена система з ПІ- та ПІД-регуляторами

Застосування ПІД-регулятора являється доцільнішим оскільки його перерегулювання менше.

4.2 Налаштування системи керування в програмному модулі PID Tuner

У командному вікні MATLAB можна викликати програмний модуль PID Tuner, використовуючи команду:

pidTuner(Wo)

Після виконання цієї команди відкривається інтерфейс PID Tuner, як показано на рисунку 4.8. У цьому вікні користувач має можливість:

– вибрати тип регулятора (наприклад, П, ПІ або ПІД);

– задати бажану швидкість виходу системи на усталене значення, вибираючи її з доступного діапазону.

Програма дозволяє автоматично налаштувати параметри регулятора, а також інтерактивно оцінювати вплив змін на динаміку системи. Це забезпечує зручність у виборі оптимальних характеристик для конкретного об’єкта управління.

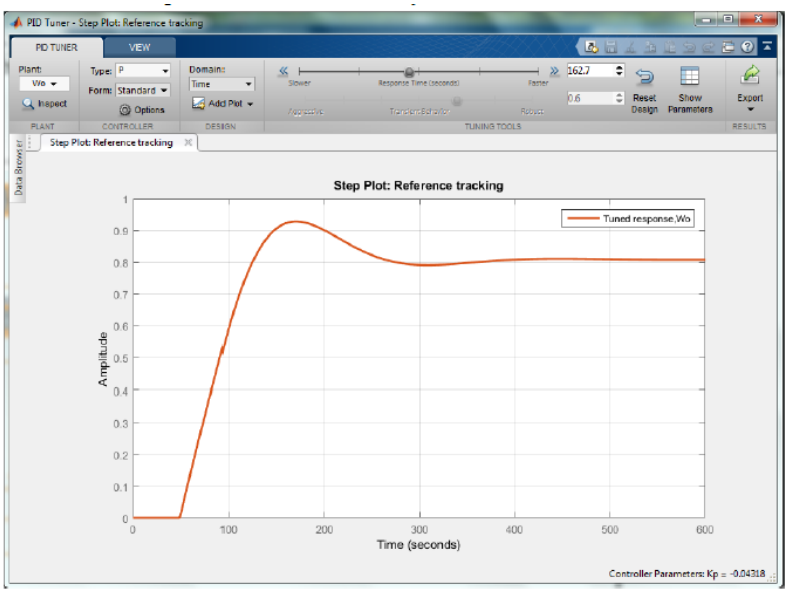


Рисунок 4.8 – Вікно редактора PID Tuner з налаштуванням П-регулятора

Після задання потрібних параметрів програмний модуль PID Tuner

автоматично обчислює оптимальні значення для регулятора, які відповідають заданим умовам. Ці параметри відображаються в нижньому правому куті вікна програми.

Для подальшої роботи отримані параметри можна експортувати в робочий простір MATLAB, скориставшись кнопкою Export**.**

У вкладці Show Parameters, як показано на рисунку 4.9, доступна детальна інформація про всі налаштовані параметри контролера, а також про ключові показники роботи системи.

До таких показників належать:

– rise time – час зростання;

– setting time – час виходу на усталений режим;

– overshoot – перерегулювання;

– phase margin – фазовий запас;

– gain margin запас – амплітуди;

– closed-loop stability – стабільність замкненої системи.

Цей функціонал дозволяє глибше проаналізувати якість налаштування регулятора і впевнитися, що система працює відповідно до вимог.

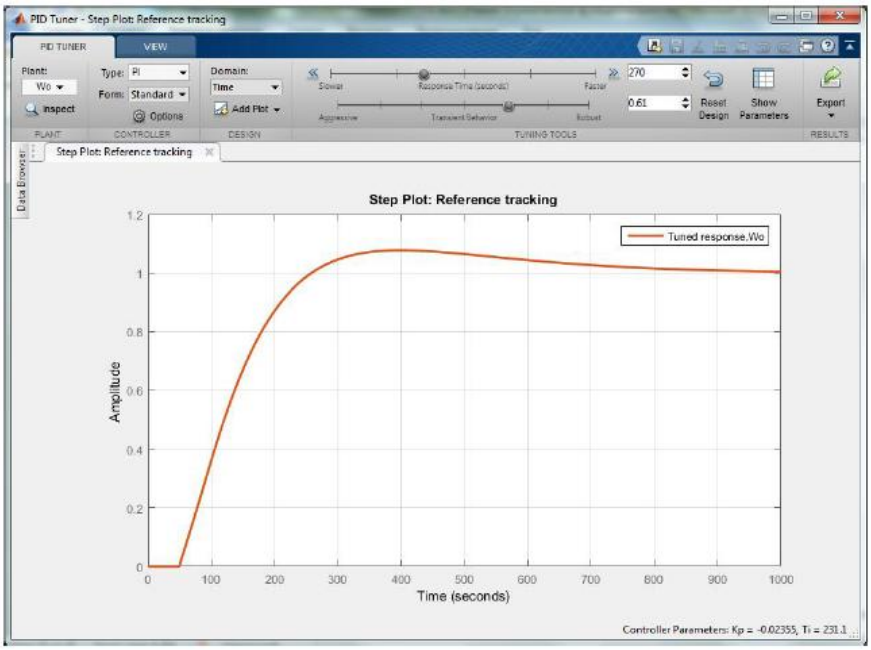
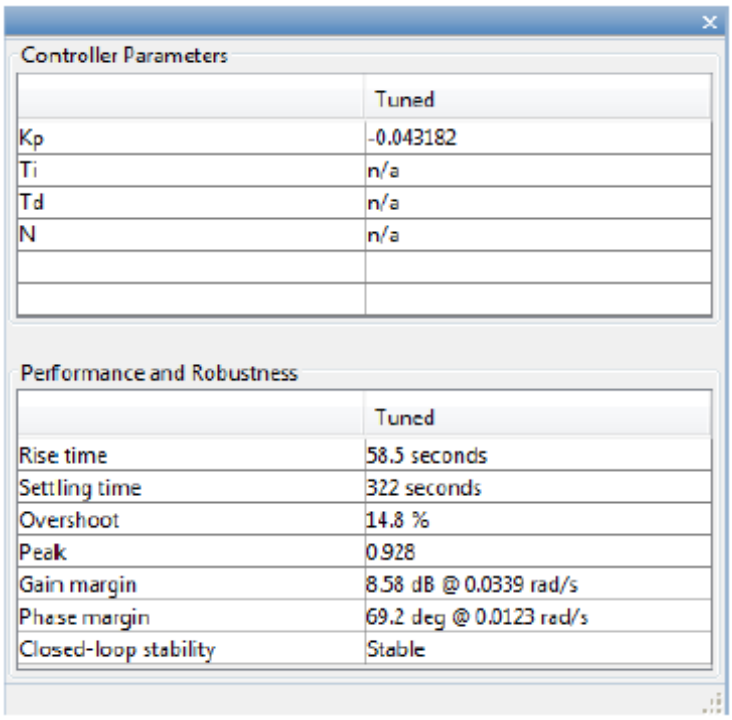


Рисунок 4.9 – Вікно редактора PID Tuner з налаштуванням ПІ-регулятора



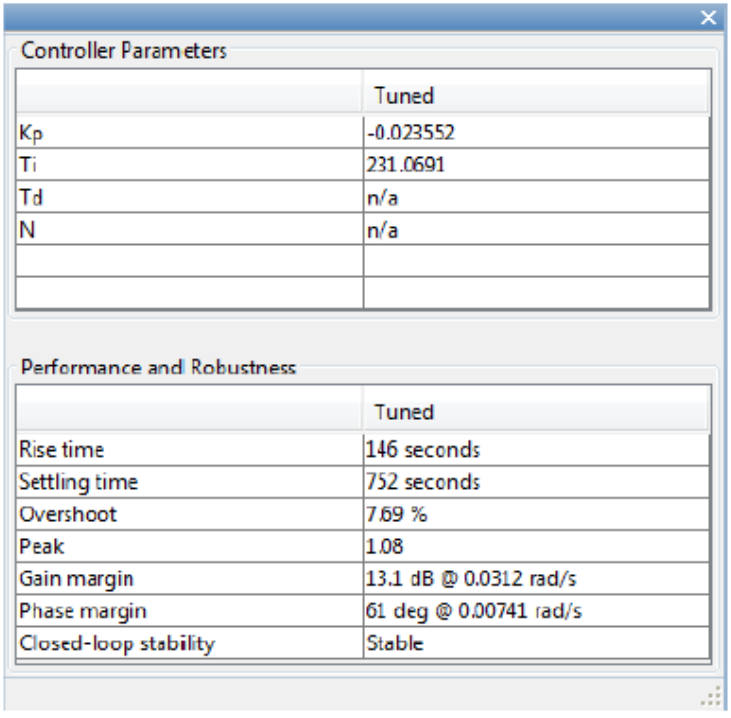
Controller Parameters

	Tuned
Kp	-0.043182
Ti	n/a
Td	n/a
N	n/a

Performance and Robustness

	Tuned
Rise time	58.5 seconds
Settling time	322 seconds
Overshoot	14.8 %
Peak	0.928
Gain margin	8.58 dB @ 0.0339 rad/s
Phase margin	69.2 deg @ 0.0123 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Рисунок 4.10 – Вікно вкладки Show Parameters параметрами П-регулятора



Controller Parameters

	Tuned
Kp	-0.023552
Ti	231.0691
Td	n/a
N	n/a

Performance and Robustness

	Tuned
Rise time	146 seconds
Settling time	752 seconds
Overshoot	7.69 %
Peak	1.08
Gain margin	13.1 dB @ 0.0312 rad/s
Phase margin	61 deg @ 0.00741 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Рисунок 4.11 – Вікно вкладки Show Parameters параметрами ПІ-регулятора

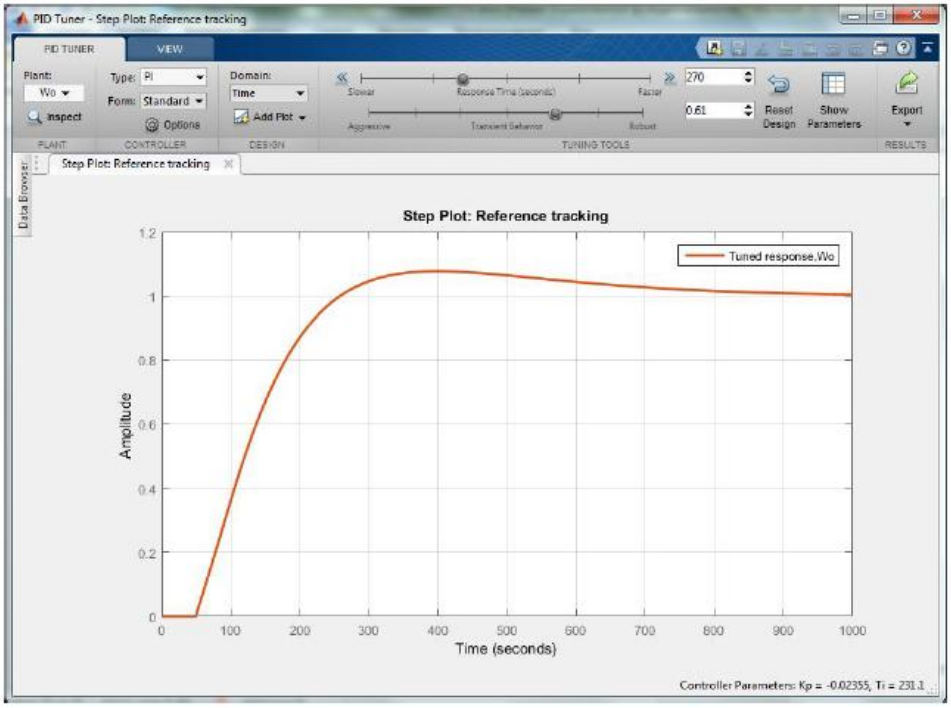
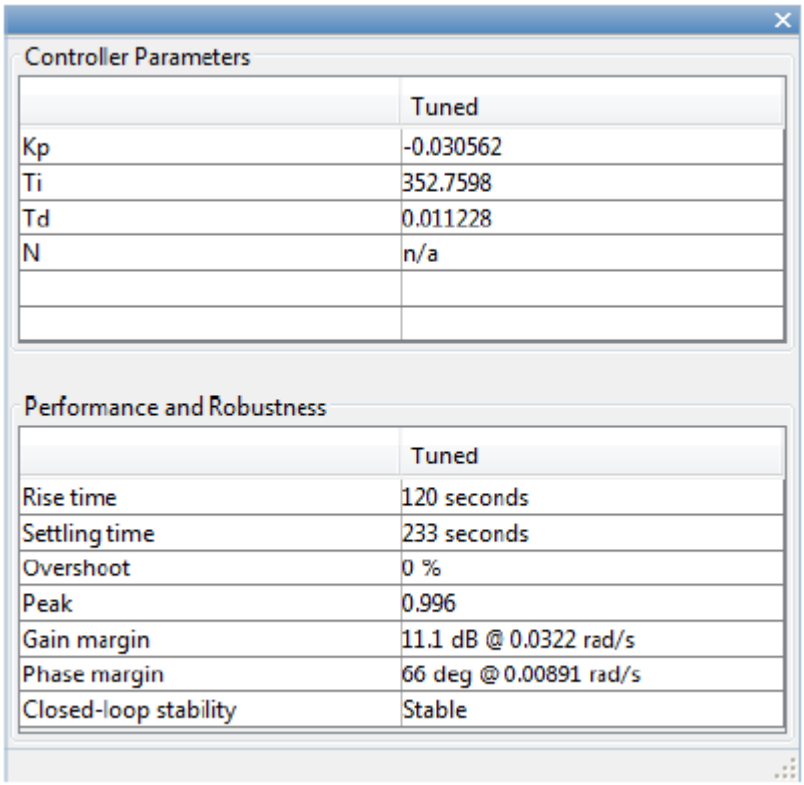


Рисунок 4.12 – Вікно редактора PID Tuner з налаштуванням ПІ-регулятора



Controller Parameters

	Tuned
Kp	-0.030562
Ti	352.7598
Td	0.011228
N	n/a

Performance and Robustness

	Tuned
Rise time	120 seconds
Settling time	233 seconds
Overshoot	0 %
Peak	0.996
Gain margin	11.1 dB @ 0.0322 rad/s
Phase margin	66 deg @ 0.00891 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Рисунок 4.13 – Вікно вкладки Show Parameters параметрами ПІД-регулятора

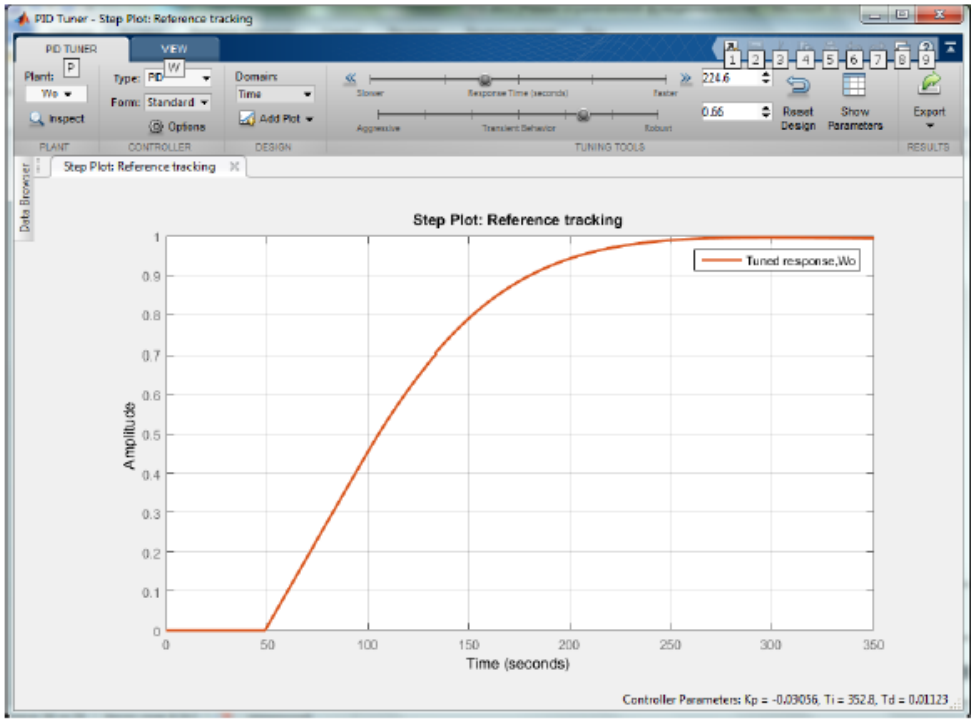


Рисунок 4.14 – Вікно редактора PID Tuner з налаштуванням ПІД-регулятора

Висновки. Провівши аналіз інформації з графіків редактора Tuner з налаштуванням П-, ПІ і ПІД-регуляторів можна зробити висновок, що використання ПІД-регулятора з отриманими налаштуваннями є оптимальними оскільки час регулювання найменший і дорівнює 252 с, а час перерегулювання – близько 0%.

5 SCADA-СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ

На базі розрахункової моделі, яку зображено на рис. . у програмному середовищі LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) було створену імітаційну модель реального апарату. На основі його теплових балансів було виведено різнецеві рівняння та записано у блок Formula у формі, яку зображено на рис.5.1.

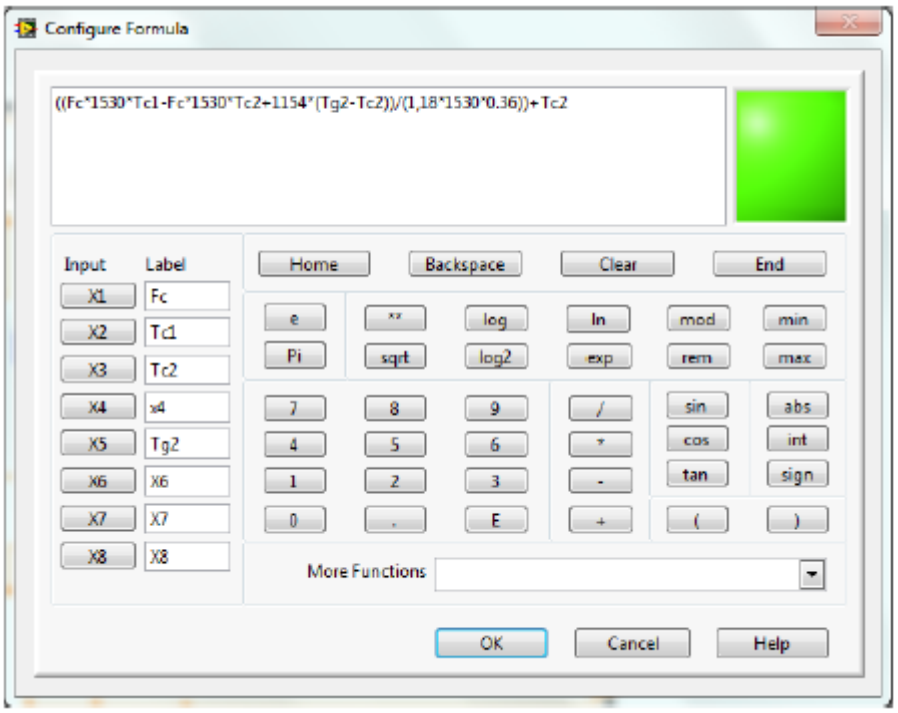


Рисунок 5.1 – Різнецеве рівняння для температури етилену в апараті

Для моделювання системи управління роботою холодильника-конденсатора був доданий ПІД-регулятор, математичний вираз для опису якого наведений на рисунку 5.2 ПІД-регулятор забезпечує автоматичне регулювання параметрів процесу шляхом пропорційного, інтегрального та диференційного впливів на систему, що дозволяє досягати точного та стабільного керування.

Для зручності користувачів був розроблений інтуїтивно зрозумілий інтерфейс (рисунок 5.3), який дає можливість швидко налаштовувати параметри регулятора.

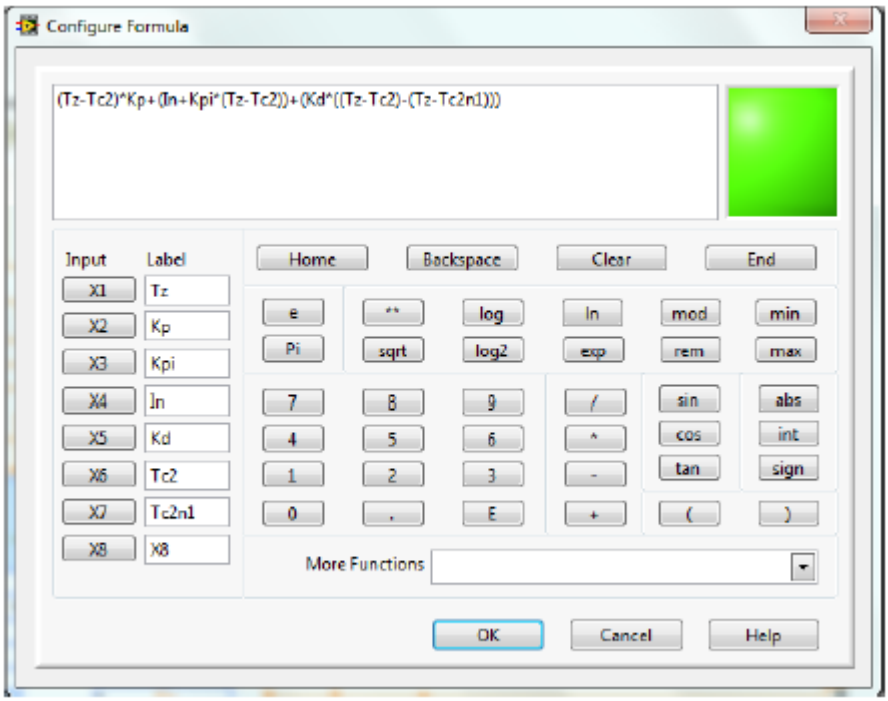


Рисунок 5.2 –ПІД-регулятор у формі різнецевого рівняння

Зокрема, він оснащений функцією налаштування за допомогою методу перехідного процесу, що дозволяє оптимізувати регулювання на основі аналізу динамічної характеристики об'єкта. Інтерфейс також має блок відображення перехідної характеристики апарата, що надає користувачу візуальне уявлення про реакцію системи на змінення вхідних параметрів.

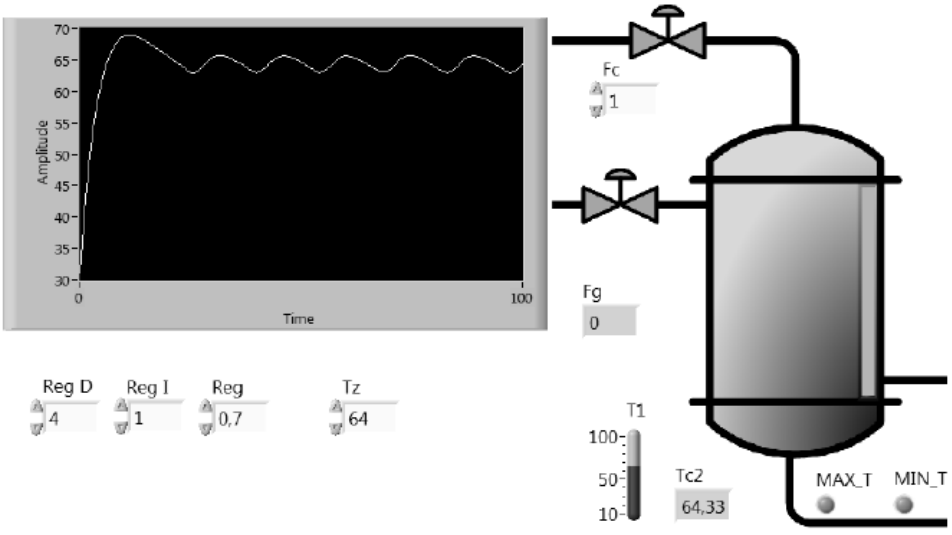


Рисунок 5.3 – Робоче поле програми LabVIEW з імітацією об’єкта керування

Для розширення функціоналу та зручності роботи, інтерфейс включає:

– моніторинг ключових параметрів: відображення в реальному часі температури, тиску, складу речовини в різних точках апарата;

– архівування даних: збереження параметрів і характеристик для подальшого аналізу й оптимізації;

– автоматичне налаштування: функція автоматичного підбору оптимальних параметрів регулятора на основі математичної моделі системи;

– аварійні сповіщення: Інтеграція попереджень про перевищення критичних параметрів або збої в роботі апарата.

На рисунку 5.4 наведена структура блочної діаграми програмного модуля.

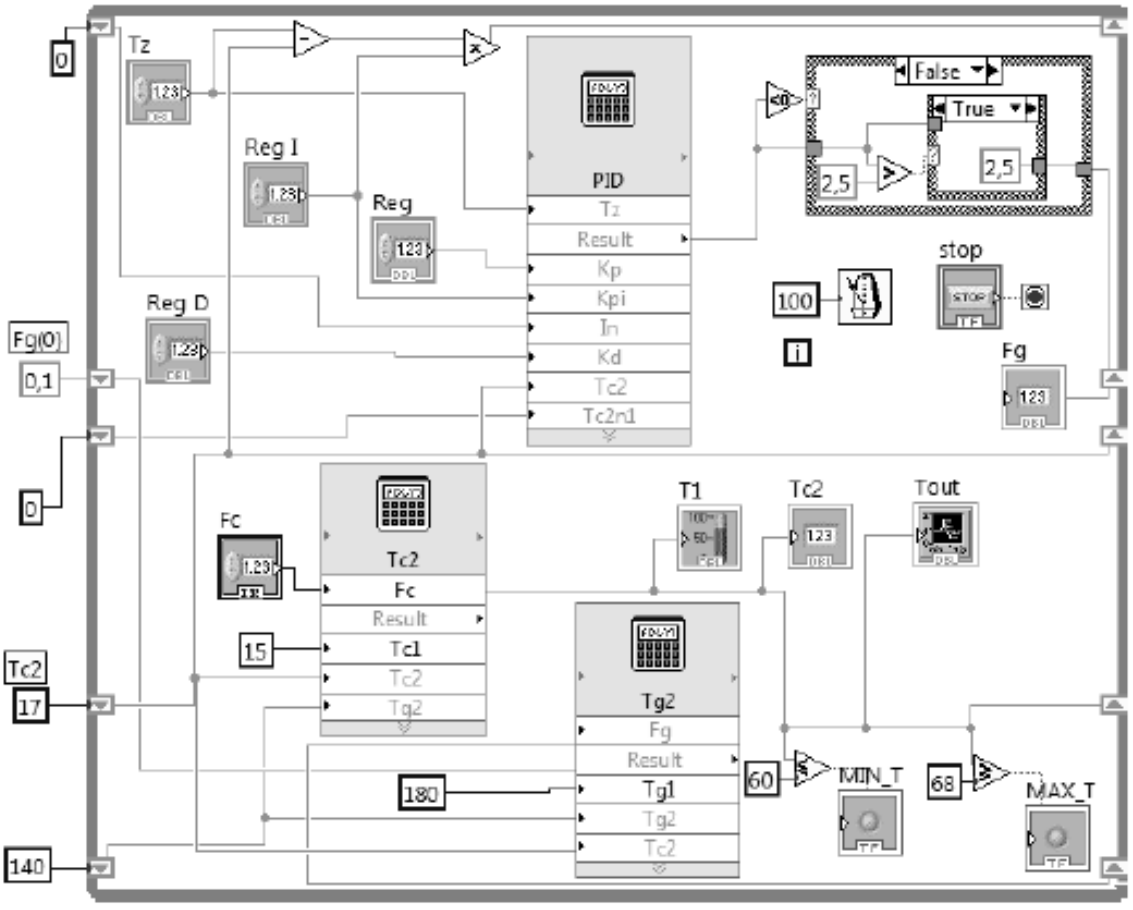


Рисунок 5.4 – Структура блочної діаграми програмного модуля

На схемі представлені елементи, що знаходяться за межами блоку циклу, які можуть бути підключені через інтерфейс до фізичних датчиків. Це забезпечує можливість обробки реальних збурень і формування адаптивного керуючого впливу на технологічний процес.

Висновки. У цьому розділі було створено SCADA-систему, яка надає можливість моніторингу та управління процесом у реальному часі.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні заходи з охорони праці виробництва етилового спирту

Згідно «Правила охорони праці при термічній обробці металів Закону України «Про охорону праці», при термічній і хіміко-термічній обробці металів можливий вплив на працівників різних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, у тому числі:

– незахищені рухливі елементи виробничого устаткування;

– заготовки, готові вироби або деталі, що пересуваються;

– транспортні засоби, що рухаються;

– аерозолі фіброгенної дії (пилу);

– несприятливий мікроклімат робочої зони;

– підвищена температура поверхонь устаткування і матеріалів;

– знижена температура при обробці деталей холодом;

– підвищена або знижена температура повітря робочої зони;

– небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;

– підвищений рівень електромагнітного випромінювання (ультрафіолетового, видимого, інфрачервоного, лазерного, мікрохвильового, радіочастотного);

– підвищена напруженість магнітного поля;

– підвищений рівень шуму на робочому місці;

– знижена освітленість робочого місця;

– пожежо- і вибухонебезпека;

– хімічні фактори загальнотоксичного, дратівного, канцерогенного впливу на організм працівника;

– важкість і напруженість праці.

При обслуговуванні електропечей мають бути дотримані наступні вимоги безпеки:

– усі струмопровідні частини електропечей, з якими можливе зіткнення обслуговуючого персоналу, мають бути ізольовані або захищені;

– обгороджування і прилади контролю, до яких підводиться електроживлення, мають бути заземлені;

– електричні печі повинні мати блокування для автоматичного відключення нагрівальних елементів при відкриванні дверець печі.

– при експлуатації електротермічного устаткування повинні використовуватися ізоляційні засоби індивідуального захисту : рукавиці, діелектричні галоші, килимки і тому подібне;

– при обслуговуванні електротермічного устаткування Правилами експлуатації електроустановок передбачені спеціальні заходи безпеки для захисту обслуговуючого персоналу від дії високих температур і теплового випромінювання. Усі механізми управління і обслуговування печей мають бути встановлені так, щоб робітник не піддавався дії високих температур і шкідливих газів. Різниця температур на поверхні печей і навколишнього повітря не повинна перевищувати 45-60°С.

Основні фактори електричного характеру включають протікання струму через тіло людини, напругу, яка діє на неї, опір її тіла, а також частоту струму. Проходження електричного струму через організм людини супроводжується термічним, електролітичним, біологічним та механічним ефектами. Ураження струмом призводить до електролізу органічних речовин в організмі, порушення біологічних процесів, скорочення м'язів та пошкодження тканин.

Основними факторами неелектричного характеру є шлях струму через тіло людини, індивідуальні особливості та стан організму, тривалість дії струму, а також раптовість і непередбачуваність його дії. Шлях струму через тіло людини має важливе значення для визначення важкості ураження. Особливо небезпечним є протікання струму через життєво

важливі органи, де вплив струму безпосередньо відбувається. Джерелами електронебезпеки в дільниці є термічні печі, дробеструменевий апарат, баки для гартування та промивальний бак. Все це обладнання працює від змінного електричного струму, та, у випадку несправності та/або неправильної експлуатації може призвести до ураження струмом. Для захисту працівників від ураження електричним струмом застосовують заземлення, захисні розділення електромереж, технічні огляди обладнання, перевірка несправностей лише у знеструмленому стані, електрозахисні засоби, підтримання сухого, незапиленого приміщення з вологістю не вище 75% та регулярні інструктажі з правил електробезпеки.

6.2 Охорона праці оператора АСУ ТП

На основі аналізу роботи існуючого обладнання і посадових обов’язків оператора АСУТП у приміщенні обладнаному ПК з ВДТ сформовані заходи по забезпеченню безпеки праці.

Приміщення, у якому здійснюються заходи пов’язані з виконанням посадових обов’язків та проведенням досліджень та розрахунків (розробкою, модернізацією, удосконаленням, тощо), є спеціалізованим, яке обладнане ПК з ВДТ.

Для запобігання ураження електричним струмом встановлено електроустаткування, яке відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ»), ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом», НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» та буде використовуватися згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної

експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ»), НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС») та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Згідно «ПУЕ», за ступенем небезпеки ураження електрострумом, робоче місце оператора АСУТП приміщення належить до 1-го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно глави 1.7 – «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ», обладнання має основну ізоляцію струмовідних частин, яка забезпечує захист від прямого дотику та подвійну, яка складається з основної та додаткової ізоляції, для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження основної ізоляції.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» усі доступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні з ПК, які можуть опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Оскільки робоче місце оператора АСУТП за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому відповідно до вимог п. 6.7.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» та додатку №1 до НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають І групу з електробезпеки.

Ймовірність механічного травмування може виникнути внаслідок нераціонального розташування робочих місць, захаращення робочих місць або у зв'язку з недбалістю та неуважністю обслуговуючого персоналу. Для виключення травматизму згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» зроблено більш зручне та

раціональне розташування робочих місць, таким чином збільшена відстань між ними, яка відповідає нормованим значення (площа на одне робоче місце має становити не менше ніж 6,0 м^2, а об'єм не менше ніж 20,0 м^3). Поверхня підлоги є рівною, неслизькою, з антистатичними властивостями.

У зв’язку із стресовими ситуаціями та нервово-емоційними навантаженнями у працівників може виникнути ймовірність захворювань загально-невротичного характеру.

З метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втоми, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» для робітників із застосування ЕОМ, передбачені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години, а також обладнані побутові приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження. В кімнаті психологічного розвантаження передбачені пристрої для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою

Для оптимізації відносин у колективі проводяться тренінги з залучанням психологів на теми: «Адаптація у новому колективі», «Поведінка в суспільстві».

Для запобігання кістково-м’язових порушень робочі місця користувачів ПК оператора АСУТП відповідають ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Висота робочої поверхні столу з ПК регулюється в межах 680-800 мм, а ширина і глибина – забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: ширина – 600-

1400 мм, глибина – 800-1000 мм). Робочий стіл має простір для ніг висотою 600 мм, шириною – 500 мм, глибиною (на рівні колін) – 450 мм, на відстані витягнутої ноги – 650 мм.

Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці для робочого місця оператора, обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Основними причинами недостатньої або надмірної освітленості робочих місць є несправність або хибний вибір освітлювальних приладів, неправильне розташування робочих місць по відношенню до джерел освітлення.

Незадовільна освітленість на робочому місці або на робочій зоні може бути причиною зниження продуктивності та якості праці, отримання травм. Недостатнє або надмірне освітлення викликає зоровий дискомфорт, що виражається у відчутті незручності або напруженості. Тривале перебування в умовах зорового дискомфорту призводить до розсіювання уваги, зменшення зосередженості, зоровій і загальній втомі.

Робоче місце оператора АСУТП обладнаному ПК з екранним пристроєм (далі – «ЕП»), згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» та ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» передбачене природне та штучне освітлення.

Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які орієнтовані на південь і забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які

створюють прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачено сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі.

Метеорологічні умови для приміщенні з комп'ютеризованими робочими місцями – температура, відносна вологість та швидкість переміщення повітря цілком відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Роботи у приміщенні з ПК, належать до категорії Іб – легка робота, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

– у холодний період року: температура 21-23°С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;

– у теплий період року: температура 22-24°С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

6.3 Пожежна безпека

Пожежа – ситуація, що найбільш часто зустрічається на підприємстві. Цехи оснащуються всіма необхідними засобами пожежогасіння та протипожежною сигналізацією. Категорія приміщень за пожежною небезпекою (СП 12.13130-2009) – А. Цех теплової обробки матеріалів відноситься до II ступеня вогнестійкості. Систему протипожежного захисту становить комплекс організаційних і технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї.

Протипожежний захист забезпечується:

– максимально можливим застосуванням негорючих і важкогорючих речовин і матеріалів замість пожежонебезпечних;

– обмеженням кількості горючих речовин і їх розміщення;

– ізоляцією горючого середовища;

– запобіганням поширенню пожежі за межі вогнища;

– застосуванням засобів пожежогасіння;

– застосуванням конструкції об'єкта з регламентованими межами вогнестійкості та горючістю;

– евакуацією людей;

– системами протидимного захисту;

– застосуванням засобів пожежної сигналізації та засобів сповіщення про пожежу;

– організацією пожежної охорони промислових об'єктів.

Систему запобігання пожежі становить комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на виключення можливості виникнення пожежі.

Запобігання пожежі досягається:

– усуненням утворення горючого середовища;

– усуненням утворення горючого (або внесення до неї) запалювання;

– підтриманням температури горючого середовища нижче максимально допустимої і іншими заходами.

В цехах і підрозділах всі машини і механізми укомплектовані вогнегасниками і ящиками з піском, в приміщеннях, на робочих місцях укомплектовані пожежні щити, організовані в кожному підрозділі куточок по пожежній безпеці з інструкціями по пожежній безпеці.

Блискавко-захисні пристрої знаходяться в справному стані, електричні лінії та електричне обладнання заземлено. Вогнегасники термін використання яких скінчився своєчасно заправляються. Досліджуване підприємство повністю відповідає встановленим вимогам пожежної безпеки відповідно до визначеної категорії.

Висновки. В даному розділі подані рекомендації що до охорони праці і пожежної безпеки, що відповідають законодавству України.

7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

7.1 Визначення капітальних вкладень

У зв'язку з розробкою імітаційної моделі автоматизованої системи установки виробництва етилового спирту та подальше його очищення від домішок проводиться техніко-економічне обґрунтування проекту.

Сума капіталовкладень на розробку проєкту становить $В_{ШУ}$ = 680000 гривень за одиницю.

Сума капіталовкладень ($К_{ов}$) на устаткування без урахування ПДВ включає вартість придбаного устаткування ($В_{уст}$) та витрати на транспортні ($В_{тр}$ = 6%) і заготівельно-складські ($В_{зс}$ = 5%) операції у визначених відсотках від $В_{уст}$.

$$К_{об} = В_{уст} + В_{тр} + В_{зс}, \quad (7.1)$$

де $В_{уст} = В_{ШУ}$

$$К_{ов} = 6800000*(1+0,06+0,05) = 7548000, \text{ грн.}$$

Додаткові капіталовкладення К на розробку проєкту складаються з таких витрат:

$$К = К_{дм} + К_{об} + К_{м}, \quad (7.2)$$

де $К_{дм}$ – витрати на демонтаж існуючої апаратури ($К_{дм} = 0,05 \cdot К_{ов}$, грн);

$К_{м}$ – витрати на монтаж нового устаткування ($К_{м} = 0,4 \cdot К_{ов}$, грн).

$$К_{дм} = 0,05 \cdot 7548000 = 377400, \text{ грн.}$$

$$К_{м} = 0,4 \cdot 7548000 = 303200, \text{ грн.}$$

$$К_{САР} = 377400 + 303200 + 7548000 = 8228600, \text{ грн.}$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.1 .

Таблиця 7.1 – Визначення капітальних вкладень

Визначення капітальних вкладень	
Витрати на монтаж нового устаткування $К_м$	323200 грн.
Сума капіталовкладень $К_{ов}$	7548000 грн.
Витрати на демонтаж існуючої апаратури $К_{дм}$	377400 грн.
Вартість придбаного устаткування $В_{уст}$	6800000 грн.
Додаткові капіталовкладення К	8228600 грн.

7.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати ($В_{САР}$), пов'язані з обслуговуванням проєкту складаються з річних витрат на:

- зарплату персоналу ($В_{зп}$);
- амортизацію нового обладнання ($В_а$);
- поточний ремонт нового обладнання ($В_р$);
- електричну енергію для живлення нового обладнання ($В_{ел}$);
- інші експлуатаційні витрати ($В_і$).
-

$$В_{САУ} = В_{зп} + В_а + В_р + В_{ел} + В_{ін}. \quad (7.3)$$

7.3 Річні витрати на ЗП

Річні витрати на ЗП обслуговуючого персоналу визначається за формулою:

$$В_{зп} = n \cdot ФОП, \quad (7.4)$$

де n – чисельність обслуговуючого персоналу (n = 50 роб.);

ФОП – середньорічний фонд оплати праці одного робітника з

обов’язковими нарахуваннями на соціальні збори.

Розрахуємо сердньорічний фонд оплати праці одного робітника з обов’язковими нарахуваннями на соціальні збори:

$$ФОП = Ф_{зп} \cdot К_{ін}, \quad (7.5)$$

де $К_{ін} = 1,1$

$Ф_{зп}$ – щорічна витрата на зарплату робітника з урахуванням нарахувань на ФОП, грн.

$$Ф_{зп} = 12 \cdot ЗП \cdot Н_{зп}, \quad (7.6)$$

де ЗП – середня місячна зарплата робітника (ЗП = 8500 грн.);

$Н_{зп}$ – нарахування на ФОП складають 20%.

Тоді:

$$Ф_{зп} = 12 \cdot 8500 \cdot (1+0,2) = 122400, грн.$$

$$ФОП = 122400 \cdot 1,1 = 134640, грн.$$

$$В_{зп} = 50 \cdot 134640 = 6732000, грн.$$

7.4 Розрахунок річних амортизаційних відрахувань

Амортизаційні відрахування ($В_а$) на реновацію придбаного устаткування на соціальні збори визначаються за виразом:

$$В_а = К \cdot Н_А /100, \quad (7.7)$$

де $Н_А$ – річна норма амортизації на реновацію ($Н_А = 24\%$);

$$В_а = 1332000 \cdot 24/100 = 319680, грн.$$

7.5 Річні витрати на ремонт

Ці витрати обчислюють через коефіцієнт $К_р$ = 3% від загальної суми капіталовкладень.

$$В_р = К_р \cdot К \text{, грн.} \quad (7.8)$$

$$В_р = 0,03 \cdot 1332000 = 39960 \text{, грн.}$$

7.6 Витрати електроенергії на живлення

Річні витрати на живлення імітаційної системи визначаються так:

$$В_{ел} = Р_{ел} \cdot Т_ф \cdot К_з \cdot СВ^{од}_{ел} \text{, грн.} \quad (7.9)$$

де $Р_{ел}$ – встановлена електрична потужність САР ($Р_{ел}$ = 3,5 кВт);

$Т_ф$ – фактичний термін роботи САР за рік ($Т_ф$ = 7800 год.);

$К_з$ – коефіцієнт для врахування реального споживання ($К_з$ = 0,8);

$СВ^{од}_{ел}$ – собівартість виробленого 1КВт · год ($СВ^{од}_{ел}$ = 90 коп.)

$$В_{ел} = 3,5 \cdot 7800 \cdot 0,8 \cdot 0,90 = 19656 \text{ грн.}$$

7.7 Інші витрати

Інші витрати визначаються так:

$$В_{ін} = 0,25 \cdot (В_а + В_{зп} + В_р) \quad (7.10)$$

$$В_{ін} = 0,25 \cdot (319680 + 6732000 + 39960) = 1772910 \text{ грн.}$$

Підставляючи отримані значення маємо загальну суму річних експлуатаційних витрат (В , грн.):

$$В = 6732000 + 319680 + 39960 + 19656 + 1772910 = 8884206 \text{ грн.}$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Розрахунок річних експлуатаційних витрат	
Зарплата персонала $В_{зп}$	6730000 грн.
Амортизація нового обладнання $В_а$	319680 грн.
Поточний ремонт нового обладнання $В_р$	39960 грн.
Електричну енергію для живлення нового обладнання $В_{ел}$	19656 грн.
Інші експлуатаційні витрати $В_{ін}$	1772910 грн.
Експлуатаційні витрати В	8884206 грн.

7.8 Річна економія експлуатаційних витрат

Економія (Е) від впровадження імітаційної системи визначається за виразом:

$$Е = Е_п + Е_н + Е_{вп} – В$$

де $Е_п$ – економія від зменшення кількості пусків через зниження відмов конвертера, грн.;

$Е_н$ – економія у зв’язку з підвищенням надійності роботи, грн.;

$Е_{вп}$ – економія у зв’язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби через впровадження, грн.;

$В_{САР}$ – вартість річних експлуатаційних витрат.

Економія ($Е_п$) від зменшення кількості пусків через зниження відмов визначається за виразом:

$$Е_п = (1 – Квід) \cdot t_{від} \cdot c_п \cdot СВ_{ел}^{од} /100, \quad (7.11)$$

де $Р_в$ – встановлена електрична потужність($Р_в = 10^6$), кВт;

$t_{від}$ – відрізок часу виведення системи з мережі при його відключенні ($t_{від}$ = 9 год);

$c_п$ – число скорочених пусків($c_п$ =1);

$СВ_{ел}^{од}$ – собівартість 1 кВт*год виробленої електроенергії ($СВ_{ел}^{од}$ = 5 коп);

$К_{від}$ – коефіцієнт корисного навантаження за час $t_{від}$ ($К_{від}$=0,7).

Тоді

$$Е_п= (1 – 0,7) \cdot 10^6 \cdot 9 \cdot 1 \cdot 5/100 = 135000 \text{ грн.}$$

Економія ($Е_н$) у зв’язку з підвищенням надійності роботи ЕС і додатковим виробленням електроенергії (dEв) визначається за виразом:

$$Е_н = (СВ^{од}_{ел} – СВМ^{од}_{ел}) \cdot W_в , \quad (7.12)$$

де $СВМ^{од}_{ел}$ – собівартість 1 кВт · год з урахуванням додаткової роботи апарату після модернізації САР визначається за виразом:

$$СВМ^{од}_{ел} = СВ^{од}_{ел} (1 – А_п \cdot (1 – W_в /(W_в + dW_в))) \quad (7.13)$$

де $А_п$ – доля умовно-постійних витрат в собівартості 1 кВт · год:

$$А_п = 1 – Вп / СВП, \quad (7.14)$$

$$В_п = 183,45 \cdot 10^6 \text{ грн.},$$

$$СВП = 210,3 \cdot 10^6 \text{ грн.},$$

$$Ап = 1 - 183,45 \cdot 10^6 / 210,3 \cdot 10^6 = 0,27$$

$$W_в = 7 \cdot 10^9 \text{ кВт*год.}$$

$$СВМ^{од}_{ел} = 5 \cdot (1 - 0,128 \cdot (1 - 7 \cdot 10^9 / (7 \cdot 10^9 + 24 \cdot 10^6))) = 0,45 \text{ коп.}$$

Тоді:

$$Е_н = (5 - 0,45) \cdot (7 \cdot 10^9 + 24 \cdot 10^6)/100 = 31959200 \text{ грн.}$$

Економія ($Е_{вп}$) у зв'язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби через проєктування визначається за виразом:

$$Е_{вп} = (СР^{од}_{ел} - СРМ^{од}_{ел})/100 \cdot WM_р, \text{ грн.} \qquad (7.15)$$

де $WM_р$ – річний обсяг реалізованої ел.енергії зі скороченими витратами на власні потреби на 20%,

$$WM_р = W_в \cdot (1 - qм^{вп}/100), \text{ кВт} \cdot \text{год}, \qquad (7.16)$$

де
$$qм^{вп} = 0,8\ q^{вп}, \qquad (7.17)$$

$$q^{вп}_С = 4,22\%.$$

$$WM_р = 7,8 \cdot 10^9 \cdot (1 - 3,38/100) = 7,54 \cdot 10^9, \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Собівартість продукції, з урахуванням зменшення витрат на власні потреби $СРМ^{од}_{ел}$ визначається за виразом:

$$СРМ^{од}_{ел} = СР^{од}_{ел}\,(1 - Ап*(1 - W_р/WM_р)) \qquad (7.18)$$

$$СРМ^{од}_{ел} = 5 \cdot (1 - 0,27 *(1-6,76*10^9 /7,54 \cdot 10^9)) = 4,92 \text{ коп.}$$

$$Е_{вп} = (5 - 4,92)/100 \cdot 7,54 \cdot 10^9 = 603200, \text{ грн.}$$

Підставляючи числові значення, розрахуємо економію (Е) від провадження САР:

$$Е = 31959200 + 603200 + 135000 – 3944277 = 2875312, грн.$$

Приріст чистого прибутку визначається так:

$$dП = К_е \cdot Е, грн. \quad (7.19)$$

де Ке – коефіцієнт економічної ефективності ($К_е = 0,7$):

$$dП = 0,7 \cdot 2,9 \cdot 10^6 = 7889000, грн.$$

Термін окупності ($Т_о$) додаткових капіталовкладень ($dК = К_{САР}$) визначається:

$$Т_о = К *(1+\alpha_а + \alpha_р + \alpha_{зсв}) / dП, років \quad (7.20)$$

де $\alpha_а$ – додаткові нарахування на амортизацію ($\alpha_а = 0,14$);

$\alpha_р$ – додаткові нарахування на поточний ремонт ($\alpha_р = 0,01$);

$\alpha_{зсв}$ – доля загально станційних витрат, визначена додатковими капіталовкладеннями ($\alpha_{зсв} = 0,20$).

$$Т_о = 8884206 \cdot (1+0,14 + 0,01+0,20)/7889000 = 2 роки.$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Річна економія експлуатаційних витрат

Розрахунок економічного ефекту від впровадження імітаційної моделі автоматизованої системи установки виробництва етилового спирту та подальше його очищення	
Економія від розробки Е	2875312 грн.
Економія від зменшення кількості пусків через зниження відмов існуючої системи $Е_п$	135000 грн.
Економія у зв'язку з підвищенням надійності ЕС $Е_н$	31959200 грн.
Економія у зв'язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби $Е_{вп}$	603200 грн.
Вартість річних експлуатаційних витрат В	8884206 грн.
Приріст чистого прибутку dП	7889000 грн.
Термін окупності додаткових капіталовкладень $Т_о$	2 роки

Висновок. В результаті проведеного розрахунку економічних показників були визначені капітальні витрати на будівництво, щорічні витрати, чистий приведений прибуток, внутрішня норма прибутку, індекс доходності, термін окупності проекту, рентабельність і так далі.

Термін окупності проекту 2 року, що свідчить про його ліквідність, тобто можливості повернути витрачені спочатку засоби на реалізацію проекту за можливо менший термін.

ВИСНОВКИ

В першому розділі ВКР магістра розглянуті основні технології і устаткування виробництва етилового спирту. Було обрано холодильник-конденсатор, як ефективний, надійний та досить універсальний апарат для виробництва етилового спирту з етилену з акцентом на подальше очищення отриманого продукту від домішок. В даному розділі також були розглянуті важливі аспекти розробки імітаційної моделі системи керування для холодильник-конденсатор з метою виробництва високоякісної продукції з мінімальними витратами електроенергії.

В другому розділі розроблена математична модель для технологічного об’єкта – холодильника-конденсатора. Досліджувалися його статичні та динамічні режими роботи, а також були виведені передатні функції для керуючого каналу та каналу збурення. На основі цих передатних функцій побудовано перехідні характеристики, які описують поведінку системи за різних умов. У подальших етапах ці передатні функції будуть використані для синтезу системи керування холодильником-конденсатором, що дозволить забезпечити ефективне регулювання його роботи.

В третьому розділі проведене експериментальне моделювання розробленої системи. Амплітудно-фазова характеристика системи є дотичною до побудованого М-кола, що підтверджує виконання умов методу налаштування. Однак отримані параметри не забезпечують достатньої точності та стійкості системи. Для досягнення кращих характеристик системи необхідно провести додаткову оптимізацію параметрів регулятора. Це може включати підбір інших значень Ті та Kr, а також повторне тестування системи на стійкість і швидкодію. Важливо зменшити перерегулювання та забезпечити адекватну зміну вихідного сигналу до усталеного значення.

В четвертому розділі виконаний синтез системи та отримані результати моделювання. Провівши аналіз інформації з графіків редактора Tuner з налаштуванням П-, ПІ і ПІД-регуляторів можна зробити висновок, що використання ПІД-регулятора з отриманими налаштуваннями є оптимальними оскільки час регулювання найменший і дорівнює 252 с, а час перерегулювання – близько 0%.

В п’ятому розділі ВКР магістра створено SCADA-систему, яка надає можливість моніторингу та управління процесом у реальному часі.

В шостому розділі подані рекомендації що до охорони праці, що відповідають законодавству України.

В сьомому розділі проведено техніко-економічні розрахунки. Термін окупності проекту 2 року, що свідчить про його ліквідність, тобто можливості повернути витрачені спочатку засоби на реалізацію проекту за можливо менший термін.

Отже, у результаті дослідження отримано систему керування, яка відповідає сучасним вимогам енергоефективності, надійності та гнучкості. Вона дозволяє знизити вплив зовнішніх збурень на процес та забезпечити стабільність роботи апарата. Інтеграція адаптивних алгоритмів і SCADA-системи створює умови для подальшої автоматизації і модернізації виробничих процесів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.

2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII *Голос України*. 2022. 19 серпня. С. 10–22.

3. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. [Чинний від 1998-12-10]. Вид. офіц. Київ, 1998. 18 с. (Інформація та документація).

4. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с. (Інформація та документація).

5. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. Київ : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Інформація та документація).

7. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [На заміну глав 5.4 5.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.6 Правил устройства электроустановок, затв. Міненерго СРСР 06.07.1984 р. ; чинний від 2002-01-01]. Київ : Мінпраці України, 2001. (Інформація та документація).

8. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30]. Київ : МВС України, 2014. 91 с. (Інформація та документація).

9. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [На заміну НАОП 1.1.10-1.01-85 ; чинний з 1997-10-06]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

10. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [На заміну ДНАОП 0.00.1.21-84 ; чинний з 1998-01-09]. Київ : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям. [На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18]. Київ : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. (Інформація та документація).

12. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Інформація та документація).

13. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ України, 1999. 106 с. (Інформація та документація).

14. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [На заміну СНиП 2.04.05-91 ; крім розділу 5 та додатка 22. ; чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [На заміну ГОСТ 27331-87; чинний з 01.01.2016]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

17. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. Київ: Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Інформація та документація).

18. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [На заміну ДБН В.2.5-56:2010 ; СНиП 2.04.05-91 (розділи 5 та 22) ; чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).

19. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [На заміну НАПБ Б.03.001-2004 ; чинний від 2018-02-23]. Київ : МВС України, 2018. 23 с. (Інформація та документація).

20. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем: навч. посіб. Черкаси : Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

21. Автоматизовані системи управління технологічними процесами: довідник / за заг. ред. Б. Б. Тимофеева ; уклад. Н. Г. Скрипаненко. Київ : Техника, 2003. 351 с.

22. Ананьєв В. П. Синтез і налагодження квазіоптимальних систем підпорядкованого регулювання в металургії: навч. посіб. Київ : Просвіта, 2007. 344 с.

23. Анзимиров Л. В. SCADA TRACE MODE – нові технології для сучасних АСУТП : навч. посіб. Київ : *Автоматизація в промисловості*, 2007. 113 с.

24. Арбузов В. В., Лакиза А. М., Войцицкий В. В., Недельчев П. А., Литвиненко И. А. Створення інтегрованої розподіленої АСУТП енергопостачальної компанії із застосуванням системи TRACE MODE : стаття. Київ : *Промислові АСУ і контролери, № 7*, 2005. 45 с.

25. Вітров И. В. CoDeSys – щоденний інструмент програміста ПЛК// *Автоматизація в проиысловості, № 8*, 2012. 45 с.

26. Вимоги до ергономіки та технічної естетики. URL: http://wikipage.com.ua/1x400f.html (дата звернення: 13.11.2024).

27. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.11.2024).

28. Кустов К. І., Шершевер М. А. Автоматичне регулювання і регулятори. Київ : Металургія, 2007. 180 с.

29. Манько О. О. Методичні вказівки та завдання до виконання контрольної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» для студентів заочної форми навчання. Рівне, 2012. 40 с.

30. Манько О. О., Кутя В. М. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» для студентів, які навчаються за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології». Рівне, 2010. 31 с.

31. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Метод.вказівки до вик. курс. проекту для студ. спец. 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» ден. та заоч. форм навчання : уклад.: К. С. Архангельська, О. Й. Рішан. Київ : НУХТ, 2005. 223 с.

32. Методичні вказівки до практичних занять з кредитного модуля «Електричні системи керування» навчальної дисципліни «Технічні засоби автоматизації – 2» для студентів напрямку підготовки «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» по спеціалізації «Автоматизація хімікотехнологічних процесів і виробництв» : укладач В. М. Ковалевський, Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. 60 с.

33. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки до курсового проекту для студентів спеціальності 151 «Автоматизація так комп'ютерно-інтегровані технології» : уклад. А. М. Ніколаєнко. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 34 с.

34. Мочалін В. Н., Кочнев Н. В. Моделювання та дослідження систем автоматичного управління з використанням ПЕОМ: навч. посіб. Київ : КГІІ, 2005. 178 с.

35. Основи охорони праці: підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. укладен. К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. за ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. Київ : Основа, 2006. 448 с.

36. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР: метод. вказівки до практичних занять для студ. напряму 0925 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навч. уклад.: В. Г. Трегуб. Київ : НУХТ, 2008. 67 с.

37. Проектування систем керування: конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами» : уклад. М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 279 с.

38. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html (дата звернення: 15.11.2023).

39. Рішан О. Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» ден. та заочн. форм. навчан. Київ : НУХТ, 2007. 162 с.

40. Сідлецький В. М., Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації : методичні рекомендації до виконання курсового проекту для студентів напряму 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» денної та заочної форм навчання : Київ, 2013. 46 с.

41. Спирт етиловий ректифікований. Технічні умови. Київ : Держспоживстандарт, 2003. – 9 с

42. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації: навч. посібник. Київ : НМК ВО, 2015. 80 с.

43. Пічне обладнання у хімічних та нафтопереробних процесах: навч. посіб. / А.Р. Степанюк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 172 с.

44. Голодний, О.С. Заєць. С.С. Термічна обробка вуглецевих сталей: *XI всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування»*. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 98 с.

45. Закономірності процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах: монографія / Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький, Є. М. Панов та ін. Київ : *НТУУ «КПІ»*, 2016. 154 с.

46. Оптимізація систем теплопостачання із використанням економіко-математичного моделювання: монографія / за заг. ред. О. М. Гаврися. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. 209 с.

47. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. Київ : Знання, 2014. 373 с.

48. Жученко О. А. Постановка задачі керування електрокальцинатором у виробництві вуглецевих виробів / О. А. Жученко, М. Г. Хібеба // *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки. Вип. 34.* 2017. 178 с.

49. Комп'ютерне моделювання теплових і електричних процесів в електрокальцинаторі / В.І. Лакомський, А.М. Пальті, Д.Д. Юрченко // *Сучасна електрометалургія. № 2 (103).* 2011. 90 с.