

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології**

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Віталій Цапар
«__» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»
спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка**

на тему: «Автоматизація процесу очищення води для ін'єкцій»

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛК-341мп

Цимбалістов Ярослав Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник: доктор філософії, асис. Жученко Л.К.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Рецензент: _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/П	Формат	Позначення		Найменування		Кількість аркушів	Примітка
1	A4			Завдання на магістерську дисертацію		1	
2	A4	ЛКз41мп.02.МД.00.001 ПЗ		Пояснювальна записка		84	
3	A2	ЛКз41мп.02.МД.00.002		Схема автоматизації		1	
4	A3	ЛКз41мп.02.МД.00.003		Математичне моделювання багатоклонної дистиляційної установки		1	
5	A3	ЛКз41мп.02.МД.00.004		Система керування технологічним об'єктом		1	
6	A3	ЛКз41мп.02.МД.00.005		Експертне оцінювання		1	
7	A3	ЛКз41мп.02.МД.00.006		Стартап-проект		1	
					ЛКз41мп.02.МД.00.000		
		П.І.Б.	Підп.	Дата			
Розробив		Цимбалістов Я.О.			Відомість магістерської дисертації	Аркуш	Аркушів
Перевірів		Жученко Л.К.				1	1
						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ТПЗА гр. ЛК-з41мп	
Н. контр.							
Зав. каф.		Цапар В.С.					

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно- інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Цимбалістов Ярослав Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу очищення води для ін'єкцій ,
науковий керівник дисертації доктор філософії, асис. Жученко Л.К. ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025 р. №4744-с

2. Термін подання студентом дисертації «___» _____ 2025 р.

3. Об'єкт дослідження багатоколонна дистиляційна установка

4. Вихідні дані Схема автоматизації; система яка забезпечує перехідний процес з перерегулюванням не більше ніж 30%; параметри які підлягають керуванню: електропровідність дистиляту (не більше 1,1 мкСм/см), температура в колонах (колона 1: 155-160°C, колона 2: 110-130°C, колона 3: 90-115°C), тиск первинної пари (4,0-5,0 бар), рівень води в колонах (20-80%), витрата живильної води (150 кг/год).

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Дослідити принцип роботи багатоколонної дистиляційної установки; розробити та спроектувати функціональну схему автоматизації з системами сигналізації та блокування;

розробити математичну модель багатоколонної дистиляційної установки як технологічного об'єкту керування з моделюванням статичного та динамічного режимів; спроектувати та дослідити систему керування з ПІД та нечітким регуляторами; розробити мнемосхему процесу; провести експертне оцінювання критичних факторів впливу на роботу установки; розробити стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Графічні зображення об'єкту керування; схема процесу виробництва води для ін'єкцій; перехідні характеристики об'єкту; зображення розробленої у MATLAB нечіткої системи

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз виробництва та процесу що досліджується	29.09.2025	
2	Розробка функціональної схеми автоматизації, систем дистанційного керування і аварійного захисту	17.10.2025	
3	Математичне моделювання досліджуваного об'єкту	02.11.2025	
4	Синтез системи керування для досліджуваного процесу	05.12.2025	
5	Створення стартап-проєкту	10.12.2025	

Студент _____

Ярослав ЦИМБАЛІСТОВ

Науковий керівник дисертації _____

Людмила ЖУЧЕНКО

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Автоматизація процесу очищення води для ін'єкцій» складається з пояснювальної записки на 84 сторінок, 1 додаток та 5 креслень. Загалом дисертація вміщує в себе 28 ілюстрацій, 30 таблиць та 15 джерел.

Мета роботи: забезпечення стабільного та ефективного виробництва води для ін'єкцій з дотриманням заданого технологічного регламенту та вимог GMP.

Об'єкт дослідження – багатоколонна дистиляційна установка для виробництва води для ін'єкцій.

Методи дослідження:

- розроблення схеми автоматизації згідно ДСТУ Б А.2.4-16:2008;
- математичне моделювання статичного та динамічного режиму;
- синтез ПІД та нечіткого регуляторів в середовищі Simulink;
- розробка мнемосхеми процесу в середовищі Ignition SCADA;
- застосування методів експертного оцінювання;
- розробка стартап-проєкту.

Результати роботи: схема автоматизації, математична модель та синтез регуляторів багатоколонної дистиляційної установки, SCADA-система диспетчеризації процесу. Робота сприяє кращому розумінню процесу виробництва води для ін'єкцій, а також закладає основу для подальших досліджень процесу, наприклад розрахунок інших об'єктів керування, що використовуються в процесі, або допрацювання системи для повної диспетчеризації виробництва.

Ключові слова: вода для ін'єкцій, WFI, багатоколонна дистиляційна установка, автоматизація, математичне моделювання, нечіткий регулятор, ПІД-регулятор, Ignition SCADA, Simulink, фармацевтичне виробництво, GMP.

ABSTRACT

The master's thesis «Automation of water for injection purification process» consists of an explanatory note of 84 pages, 1 appendix and 5 drawings. In total, the thesis contains 28 illustrations, 30 tables, and 15 references.

Purpose: ensuring stable and efficient production of water for injection in compliance with the specified technological regulations and GMP requirements.

Object of research – multi-column distillation unit for water for injection production.

Research methods:

- development of automation scheme according to DSTU B A.2.4-16:2008;
- static and dynamic mathematical modeling;
- PID and fuzzy controllers synthesis in Simulink environment;
- process mnemonic scheme development in Ignition SCADA environment;
- application of expert evaluation methods;
- development of a startup project.

Work results: automation scheme, mathematical model and controllers synthesis for multi-column distillation unit, process dispatching SCADA system. The thesis contributes to a better understanding of water for injection production process and provides a foundation for further research, such as calculation of other control objects used in the process or system improvement for full production dispatching.

Keywords: water for injection, WFI, multi-column distillation unit, automation, mathematical modeling, fuzzy controller, PID controller, Ignition SCADA, Simulink, pharmaceutical production, GMP.

**Пояснювальна записка
до магістерської дисертації**

**на тему: «Автоматизація процесу очищення води
для ін'єкцій»**

Київ – 2025 рік

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ДЛЯ ІН'ЄКЦІЙ (WFI LOOP)	6
1.1. Опис технологічного процесу очищення води для ін'єкцій	6
1.2. Постановка задачі на дослідження	9
1.3. Висновок до розділу	10
2. РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БАГАТОКОЛОННОЇ ДИСТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ	12
2.1. Аналіз технологічної схеми процесу для постановки завдань до розробки схеми автоматизації з електричними системами керування.....	12
2.2. Опис схеми автоматизації технологічного процесу	16
2.3. Висновок до розділу	21
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОКОЛОННОЇ ДИСТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ.....	22
3.1. Моделювання статичного режиму	22
3.1.1. Побудова статичної характеристики	24
3.2. Моделювання динамічного режиму	25
3.3. Синтез ПД регулятора системи керування багатоколонної дистиляційної установки	29
3.4. Синтез нечіткого регулятора системи керування багатоколонної дистиляційної установки	31
3.4.1. Вибір та опис лінгвістичних змінних	33
3.4.2. Створення нечіткої математичної моделі об'єкта керування та правил продукції.....	33

					ЛК-34.1мн оз МЛ оз оз оз ПЗ				
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Цимбалістов				Автоматизація процесу очищення води для ін'єкцій	Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів	Жученко Л.К.						1	84	
Т. контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ТПЗА гр. ЛК-34.1мн			
Н. контр.									
Затв.	Цапар В.С.								

3.5. Порівняння контурів з ПД та нечітким регулятором	40
3.6. Висновок до розділу	41
4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ	44
4.1. Загальні відомості про SCADA-системи	44
4.2. Можливості Ignition SCADA для розробки мнемонічної схеми технологічного об'єкту керування	45
4.3. Розробка мнемонічної схеми багатоклонної дистиляційної установки	46
4.4. Висновок до розділу	48
5. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ	50
5.1. Формулювання задачі системи експертного оцінювання	50
5.2. Математична обробка результатів ранжування	53
5.3. Висновок до розділу	60
6. СТВОРЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	62
6.1. Опис ідеї проекту	62
6.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	63
6.3. Розробка ринкової стратегії проекту	66
6.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	67
6.5. SWOT-аналіз	68
6.6. Висновок до розділу	69
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73
Додаток А. Специфікація устаткування, виробів і матеріалів	75

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		2

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

WFI (Water for Injection) – вода для ін'єкцій

GMP (Good Manufacturing Practice) – належна виробнича практика

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – система диспетчерського керування та збору даних

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

SAP – система автоматичного регулювання

ОК – об'єкт керування

ПЛК – програмований логічний контролер

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

EDI – електродеіонізація

RO (Reverse Osmosis) – зворотний осмос

УФ – ультрафіолет

ТОК – технологічний об'єкт керування

ДСА – дистанційне і автоматичне керування

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		3

ВСТУП

Вода для ін'єкцій (Water for Injection, WFI) є одним з найважливіших допоміжних матеріалів у фармацевтичній промисловості, оскільки використовується для приготування стерильних ін'єкційних та інфузійних препаратів, що вводяться безпосередньо в організм людини. Якість води безпосередньо впливає на безпеку та ефективність лікарських засобів, тому до неї встановлюються найсуворіші вимоги міжнародних стандартів, зокрема вимог GMP.

Процес дистиляції характеризується високою інерційністю, складною взаємодією теплових та масообмінних процесів у трьох послідовно з'єднаних колонах, а також чутливістю до збурень з боку якості живильної води та тиску технологічної пари. Забезпечення стабільних температурних режимів у кожній колоні (160°C, 120°C, 90°C відповідно) та підтримання електропровідності дистиляту на заданому рівні вимагає застосування сучасних систем автоматичного керування з інтелектуальними алгоритмами регулювання.

Об'єкт дослідження – багатоколонна дистиляційна установка для виробництва води для ін'єкцій.

Предмет дослідження – система автоматичного керування процесом очищення води з забезпеченням стабільної якості продукту.

Метою роботи є розробка системи автоматизації процесу очищення води на базі багатоколонної дистиляційної установки. Досягнення цієї мети передбачає аналіз технологічної схеми процесу, математичне моделювання об'єкта керування, синтез систем регулювання з різними типами регуляторів, розробку SCADA-системи диспетчеризації та застосування методів експертного оцінювання для визначення критичних факторів впливу на якість продукту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати технологічний процес виробництва води для ін'єкцій та принцип роботи багатоколонної дистиляційної установки;

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		4

- Розробити схему автоматизації процесу, включаючи системи технологічної сигналізації та блокування;
- Побудувати математичну модель багатоколонної дистиляційної установки з моделюванням статичного та динамічного режимів роботи;
- Синтезувати та дослідити систему керування (ПД-регулятор та нечіткий регулятор);
- Розробити мнемосхему процесу в середовищі для візуалізації та диспетчеризації технологічних параметрів;
- Застосувати методи експертного оцінювання для визначення найбільш критичних факторів, що впливають на безвідмовну роботу установки;
- Розробити концепцію стартап-проекту для комерціалізації системи автоматизації.

Результати проведеної роботи можуть бути використані для впровадження на фармацевтичних підприємствах з метою підвищення якості води, забезпечення відповідності регуляторним вимогам GMP та оптимізації енерговитрат у процесі дистиляції.

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		5

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ДЛЯ ІН'ЄКЦІЙ (WFI LOOP)

1.1. Опис технологічного процесу очищення води для ін'єкцій

Виробництво води для ін'єкцій (Water for Injection, WFI) є критично важливим процесом на фармацевтичному підприємстві, оскільки якість води безпосередньо впливає на безпеку та ефективність лікарських препаратів. Ця вода використовується для приготування лікарських розчинів, миття ампул, флаконів, устаткування та систем стерилізації. Якість води регламентується стандартами GMP (Good Manufacturing Practice) та повинна відповідати найвищому рівню чистоти – практично без іонів, органіки та мікроорганізмів. Технологічна схема, яка була вивчена під час практики, представляє собою багатоступеневу систему очищення, що включає фізико-хімічні та мембранні методи, які забезпечують видалення механічних домішок, органічних речовин, мікроорганізмів, пірогенів та іонних забруднень.

Процес починається з подачі вихідної води, яка проходить через систему попередньої підготовки. На першому етапі вода надходить до колон 6, 7 та 8. В кожній колоні вода випаровується, а всі домішки (солі, мінерали) залишаються в рідкій фазі. Цей концентрат домішок періодично видаляється з системи через лінію «Продувка». Процес побудований за енергоефективним принципом: тільки перша колона 6 гріється зовнішнім паром температурою 150-170°C. Пара, що утворилася в першій колоні 6, використовується для нагрівання води в другій 7, пара з другої – для нагріву третьої 8, і так далі. Чиста пара з останніх колон збирається і надходить у фінальний теплообмінник-конденсатор 2. Тут вода охолоджується за допомогою холодоагенту до 70-95°C.

Після дистиляції вода надходить до адсорбера 12, де відбувається видалення органічних домішок, хлору та хлорамінів. Як адсорбент використовується активоване вугілля, яке має високу питому поверхню та здатність поглинати широкий спектр органічних сполук. Цей етап особливо важливий, оскільки

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		6

залишки хлору можуть пошкодити мембрани зворотного осмосу на наступних стадіях очищення.

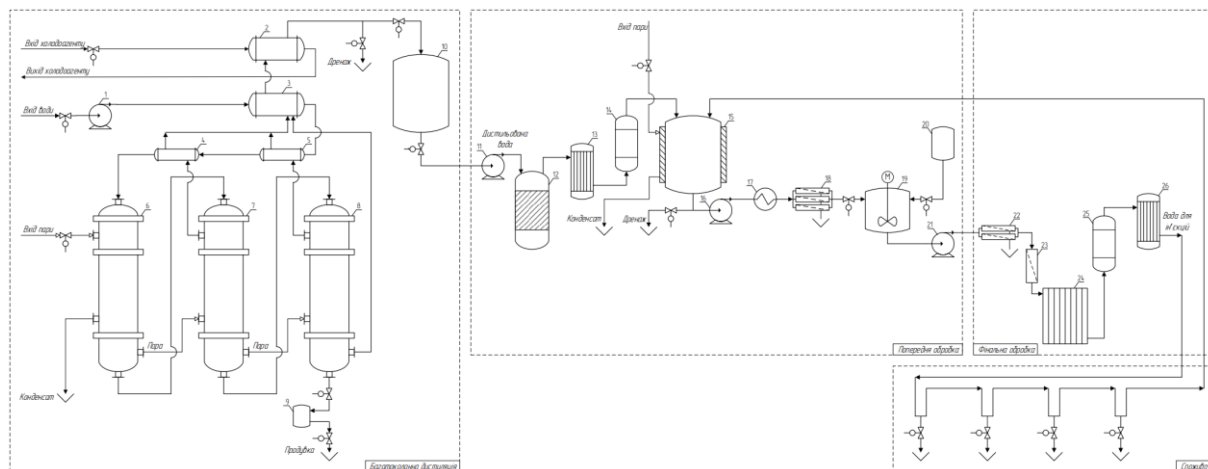


Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва води високої чистоти:

1, 11, 16, 21 – насос; 2, 3, 4, 5 – теплообмінник; 6 – випарник з нагрівачем; 7, 8 – випарник; 9, 10 – накопичувальний бак; 12 – адсорбер; 13 – фільтр тонкої очистки; 14, 25 – УФ-лампа 254 нм; 15 – накопичувальний бак з рубашкою; 18 – зворотний осмос, 1-й прохід; 19 – мішалка; 20 – бак з реагентом; 22 – зворотний осмос, 2-й прохід; 23 – мембранний дегазатор; 24 – електричний деіонізатор; 26 – фінальний фільтр з ультрафільтрацією.

Після адсорбера вода проходить через фільтр тонкого очищення 13 з розміром пор 5-10 мікрон, який затримує механічні частинки та залишки адсорбенту. Далі встановлена УФ-лампа 14 з довжиною хвилі 254 нм, яка забезпечує первинне знезараження води шляхом руйнування ДНК мікроорганізмів та для руйнування складних сполук хлору (хлорамінів). Опромінення ультрафіолетом не призводить до утворення побічних продуктів і є екологічно безпечним методом дезінфекції.

Очищена на цьому етапі вода надходить до накопичувального бака з рубашкою 15, який служить буферною ємністю перед системою зворотного осмосу. Бак обладнаний системою підігріву через рубашку, що дозволяє підтримувати температуру води на рівні 70-90°C для запобігання

мікробіологічному забрудненню. Також в цей бак подається вода з циркуляційної системи споживачів.

Наступним критичним етапом є двоступенева система зворотного осмосу. Насос високого тиску 16 подає воду під тиском 15-25 бар на мембрани першого проходу зворотного осмосу 18. На цьому етапі видаляється до 95-98% розчинених солей, органічних молекул та колоїдних часток. Мембрани зворотного осмосу являють собою напівпроникні бар'єри, які пропускають молекули води, але затримують більшість інших речовин. Ефективність роботи мембран контролюється шляхом вимірювання електропровідності вхідної води. Концентрат, що містить відкинуті забруднення, відводиться в дренаж.

Між першим і другим проходом зворотного осмосу встановлена система корекції рН. Вода після першого проходу має низький рН через видалення лужних компонентів, що може негативно впливати на ефективність другого проходу. Тому до води дозується реагент з бака 20 під контролем мішалки 19, який підвищує рН до оптимального значення 6-7. Це дозволяє досягти максимального коефіцієнту відкидання на другому проході і захистити мембрани від кислотної деградації.

Другий прохід зворотного осмосу 22 забезпечує додаткове очищення, знижуючи електропровідність води до значень менше 1 мкСм/см, що вже наближається до показників високочистої води.

Після двоступеневого зворотного осмосу 22 вода надходить до мембранного дегазатора 23, де відбувається видалення розчинених газів, зокрема діоксиду вуглецю. Видалення CO₂ є важливим, оскільки цей газ розчиняється у воді з утворенням вугільної кислоти, що підвищує електропровідність та знижує рН. Дегазатор працює за принципом контакту води з повітрям через газопроникну мембрану, що дозволяє ефективно видалити до 99% розчиненого діоксиду вуглецю без контакту води з атмосферою.

Наступним етапом є електродеіонізація (EDI) – процес, що поєднує іонний обмін та електродіаліз для досягнення максимальної чистоти води. В електродеіонізаторі 24 під дією постійного електричного струму іони мігрують

					ЛКЗ 4.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

через іонообмінні мембрани до відповідних електродів, забезпечуючи безперервну регенерацію іонообмінних смол та видалення навіть слідових кількостей іонних забруднень. Цей процес дозволяє досягти електропровідності на рівні 0,055-0,1 мкСм/см при 25°C.

Заключний етап включає УФ-опромінення лампою 254 нм та фінальну ультрафільтрацію. Друга УФ-лампа 25 забезпечує додаткове знезараження та знижує вміст органічного вуглецю шляхом фотоокислення органічних молекул. Фінальний фільтр 26 з ультрафільтраційною мембраною має розмір пор 0,2 мікрона і служить абсолютним бар'єром для бактерій та їх залишків (ендотоксинів).

Після фінальної обробки вода надходить у циркуляційну систему – замкнутий контур розподілу, який забезпечує постійну циркуляцію гарячої води (70-90°C) до точок споживання (кранів) на виробництві. Постійна циркуляція при підвищеній температурі запобігає застою води та росту мікроорганізмів у трубопроводах. Матеріали системи розподілу виготовлені з високоякісної нержавіючої сталі з електрополірованою внутрішньою поверхнею, що мінімізує адгезію мікроорганізмів та утворення біоплівки.

1.2. Постановка задачі на дослідження

Основним апаратом технологічної схеми є багатоколонна дистиляційна установка, яка забезпечує видалення іонних та органічних домішок шляхом багатоступеневого випаровування. Ефективність роботи цієї установки залежить від точності підтримання температурних режимів у кожній колоні, стабільності тиску пари та своєчасного видалення концентрату домішок.

Існуючі системи керування багатоколонними дистиляційними установками часто базуються на класичних ПІД-регуляторах, які не завжди забезпечують оптимальну якість перехідних процесів при зміні навантаження або складу вихідної води. Крім того, доступна інформація про автоматизацію саме фармацевтичних

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		9

установок WFI є обмеженою через специфічні вимоги GMP та необхідність валідації всіх систем керування.

Основною метою дослідження є розробка ефективної системи автоматизації процесу виробництва води для ін'єкцій, яка забезпечить стабільну якість продукції при мінімальних енергетичних витратах. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- 1) Проектування функціональної схеми автоматизації технологічного процесу виробництва WFI з визначенням контрольованих параметрів, точок вимірювання та виконавчих механізмів для кожного етапу очищення.
- 2) Розробка математичної моделі багатоклонної дистиляційної установки, яка враховує теплові зв'язки між колонами, динаміку зміни температури та концентрації домішок при зміні режимів роботи.
- 3) Синтез системи керування температурним режимом колон.
- 4) Розробка системи моніторингу якості води на базі SCADA-платформи з можливістю реєстрації всіх технологічних параметрів для валідації процесу відповідно до вимог GMP.
- 5) Проведення експертного оцінювання потенційних ризиків порушення якості WFI та розробка системи попереджувальної сигналізації для запобігання аварійним ситуаціям.
- 6) Розробка концепції стартап-проекту для впровадження розробленої системи автоматизації на фармацевтичних підприємствах.

1.3. Висновок до розділу

У даному розділі проведено детальний аналіз технологічного процесу виробництва води для ін'єкцій методом багатоклонної дистиляції з подальшою мембранною обробкою. Розглянуто принцип роботи кожного етапу очищення: від

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

багатоступеневого випаровування у дистиляційних колонах до фінальної ультрафільтрації та циркуляційної системи розподілу.

Встановлено, що ключовим апаратом технологічної схеми є багатоколонна дистиляційна установка, яка працює за принципом послідовного використання теплоти пари. Визначено основні параметри, що підлягають контролю та регулюванню: температура пари у колонах, електропровідність води на різних етапах, тиск у системі зворотного осмосу, рН води та витрати реагентів.

Аналіз технологічного процесу показав необхідність розробки комплексної системи автоматизації, яка забезпечить стабільну якість води для ін'єкцій при мінімальних енергетичних витратах. Сформульовано конкретні задачі дослідження, спрямовані на створення ефективної системи керування з використанням сучасних підходів та засобів автоматизації.

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

2. РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БАГАТОКОЛОННОЇ ДИСТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Аналіз технологічної схеми процесу для постановки завдань до розробки схеми автоматизації з електричними системами керування

Одним із ключових елементів технологічної схеми виробництва води для ін'єкцій виступає багатоколонна дистиляційна установка. Як було зазначено вище, саме тут відбувається критичне очищення води від пірогенів, мікроорганізмів та органічних домішок шляхом випаровування та конденсації. Дана система забезпечує досягнення електропровідності води менше 1,1 мкСм/см. Розглянемо вибраний технологічний об'єкт керування, схема якого представлена на рисунку 2.1.

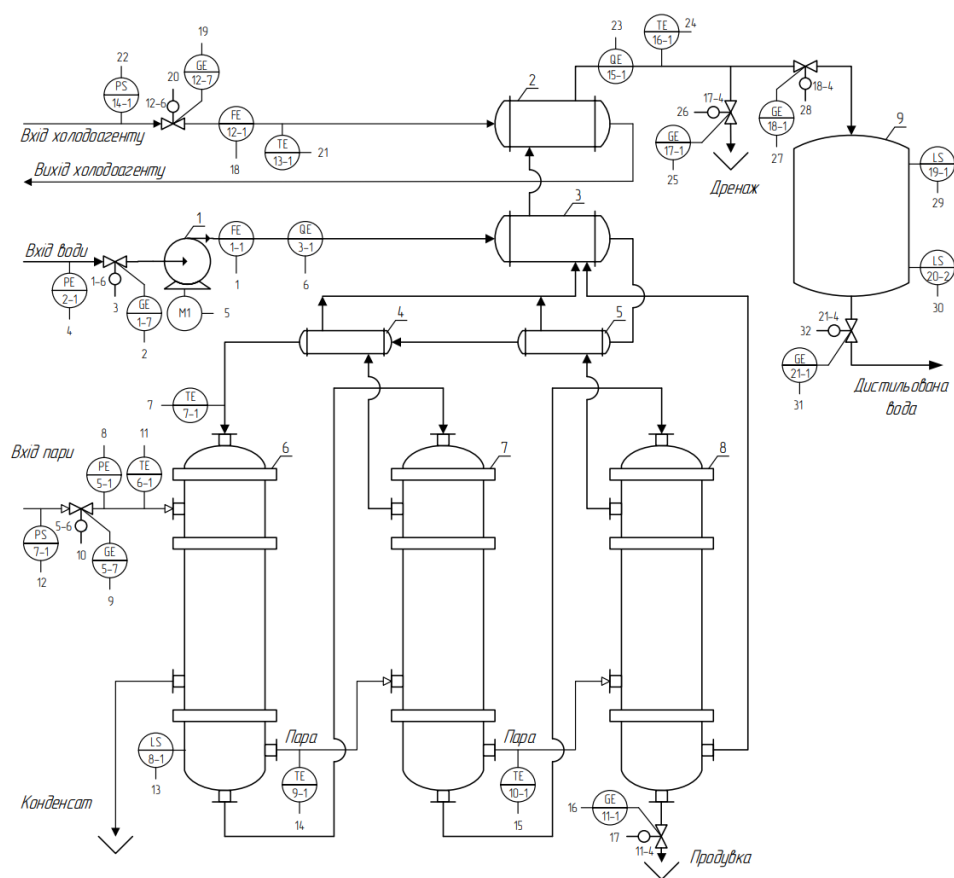


Рисунок 2.1 – Схема автоматизації

					ЛК 34.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		12

Багатоколонна дистиляційна установка складається з трьох послідовно з'єднаних випарних колон, що працюють за принципом багатоступеневого випаровування з використанням пари як джерела енергії. У першу колону знизу подається пара під тиском близько 6 бар з температурою близько 160°C. Вода випаровується, а пара піднімається вгору та конденсується, передаючи теплоту наступним колонам. Кожна наступна колона працює при нижчому тиску та температурі, що дозволяє використовувати теплоту конденсації пари попередньої колони для випаровування води в наступній. Таким чином реалізується енергоефективний багатостадійний процес дистиляції.

Схеми автоматизації багатоколонних дистиляторів можуть варіюватися залежно від конфігурації обладнання та специфічних вимог виробництва, проте зазвичай містять наступні обов'язкові елементи:

- датчики вимірювання витрати живильної води та пари, концентрації (електропровідності), температури в кожній колоні та охолоджувальній системі, рівня води в випарниках, які збирають дані про стан процесу та передають їх до системи контролю;
- система контролю та керування на базі PLC з функціями сигналізації відхилень параметрів та автоматичного регулювання;
- блоки ручного управління для можливості перемикання між автоматичним та ручним режимами роботи;
- перетворювачі сигналів для узгодження різних типів датчиків з системою керування;
- регулювальні клапани з пневматичними або електричними приводами для керування потоками пари, води та дистиляту;
- інтерфейс користувача (HMI/SCADA) для візуалізації процесу та взаємодії оператора з системою автоматизації;
- система безпеки та аварійного вимкнення з функціями захисту від перегріву, перетиску та інших аварійних ситуацій.

					ЛК 34.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		13

Типова система автоматизації дистиляторів для виробництва WFI зазвичай реалізує каскадне керування, де основним регульованим параметром виступає електропровідність дистиляту, а керуючими впливами є витрата живильної води та витрата первинної пари. Додатково здійснюється контроль та підтримка температурних режимів у кожній колоні, тиску пари та рівнів у збірниках.

На практиці часто використовується схема з головним контуром регулювання якості дистиляту та підлеглими контурами регулювання витрат та температур. Така структура забезпечує високу якість регулювання та швидку реакцію на збурення. Важливою особливістю є наявність блокувань, які запобігають пуску установки при недостатньому тиску пари або витраті живильної води, а також забезпечують аварійне вимкнення при перевищенні допустимих значень електропровідності дистиляту.

В результаті аналізу процесу виробництва води для ін'єкцій на багатоколонній дистиляційній установці було визначено наступні параметри, автоматичний контроль та регулювання яких потрібно забезпечити:

Параметри, що потребують контролю та регулювання:

- Витрата живильної води на вході в дистилятор;
- Електропровідність води на вході в дистилятор;
- Температура живильної води перед входом у випарні колони;
- Тиск первинної пари на вході в першу колону;
- Витрата первинної пари;
- Температура в кожній випарній колоні (3 точки вимірювання);
- Електропровідність дистиляту на виході з установки;
- Температура дистиляту після охолодження;
- Рівень дистиляту в накопичувальному баку після установки;
- Температура холодоагенту;
- Витрата холодоагенту.

					ЛК 3.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		14

Параметри для технологічної сигналізації:

- Температура в кожній випарній колоні з сигналізацією верхньої та нижньої меж;
- Тиск первинної пари з сигналізацією низького значення;
- Рівень води в першій випарній колоні;
- Електропровідність дистиляту з сигналізацією перевищення допустимого значення;
- Тиск живильної води на вході в дистилятор з сигналізацією низького рівня;
- Рівень дистиляту в накопичувальному баку з сигналізацією верхнього та нижнього рівнів;
- Тиск у трубопроводі після насоса подачі живильної води;
- Тиск у трубопроводі після насоса циркуляції холодоагенту.

Таблиця 2.1 – Параметри контролю виробництва води для ін'єкцій

№ п/п	Найменування стадії процесу (технологічний об'єкт), місце заміру параметра	Найменування параметра, що контролюється чи регулюється	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Вимоги до схеми автоматизації (контроль, регулювання, сигналізація)
1	2	3	4	5
1	Живильна вода, трубопровід на вході в дистилятор	Витрата	150 кг/год	Контроль, регулювання
2	Живильна вода, трубопровід на вході в дистилятор	Електропровідність	<5 мкСм/см	Контроль
3	Живильна вода, трубопровід на вході в дистилятор	Тиск	3-5 бар	Сигналізація
4	Живильна вода, трубопровід перед випарними колонами	Температура	60-80°C	Контроль
5	Первинна пара, трубопровід на вході в колону 1	Тиск	5,5-6,5 бар	Контроль, регулювання, сигналізація
6	Первинна пара, трубопровід	Витрата	-	Контроль

Продовження табл. 2.1

7	Випарна колона 1	Температура	155-160°C	Контроль, сигналізація
8	Випарна колона 1	Рівень води	20-80%	Контроль, сигналізація
9	Випарна колона 2	Температура	110-130°C	Контроль, сигналізація
10	Випарна колона 3	Температура	90-115°C	Контроль, сигналізація
11	Дистилят, трубопровід на виході з установки	Електропровідність	<1,3 мкСм/см	Контроль, регулювання, сигналізація
12	Дистилят, трубопровід після охолодження	Температура	85-95°C	Контроль, регулювання
13	Дистилят, накопичувальний бак	Рівень	0-100%	Контроль, регулювання, сигналізація
14	Холодоагент, трубопровід на вході в теплообмінник	Температура	10-20°C	Контроль
15	Холодоагент, трубопровід	Витрата	-	Контроль, регулювання
16	Холодоагент, трубопровід клапаном	Тиск	>1,5 бар	Контроль, сигналізація

2.2. Опис схеми автоматизації технологічного процесу

Розглянемо детально контури контролю, регулювання та сигналізації згідно з розробленою технологічною схемою багатоколонної дистиляційної установки для виробництва води для ін’єкцій.

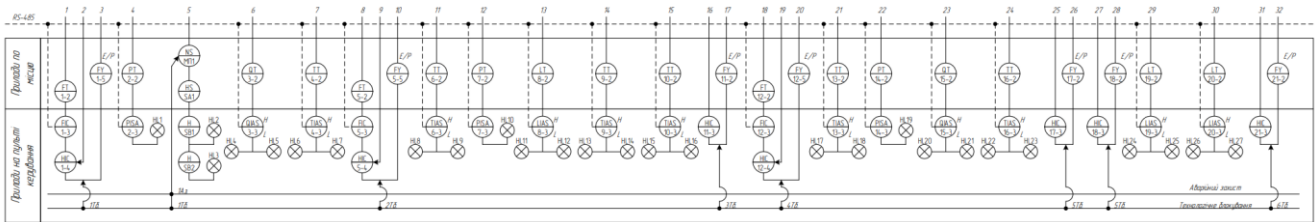


Рисунок 2.1 – Фрагмент схеми автоматизації

Контур 1 контролює тиск живильної води на вході в систему і включає датчик тиску PE (поз. 1-1) з діапазоном 0-10 бар, перетворювач тиску PT (поз. 1-2), який передає сигнал 4-20 мА до приладу індикації PI (поз. 1-3). Номінальний тиск становить 3,5 бар, при падінні нижче 2,0 бар спрацьовує блокування насоса М1 для захисту від сухого ходу. Цей контур забезпечує первинний контроль наявності води в системі.

Контур 2 керує подачею живильної води через регулювальний клапан (поз. 2-1) з датчиком положення GE (поз. 2-2), перетворювачем сигналу GY (поз. 2-3) та блоком керування вентилем. Клапан встановлений після датчика тиску, тому є можливість відсікання подачі води при необхідності. Номінальне положення клапану становить 65% відкриття.

Контур 3 контролює якість живильної води через кондуктометричний датчик QE (поз. 3-1) з діапазоном 0-50 мкСм/см, перетворювач QT (поз. 3-2) та прилад індикації QI (поз. 3-3). Номінальне значення становить 8-12 мкСм/см для водопровідної води. Цей контроль необхідний для моніторингу вихідної якості води та прогнозування.

Контур 4 регулює витрату живильної води і складається з електромагнітного витратоміра FE (поз. 4-1) з діапазоном 0-200 кг/год, перетворювача витрати FT (поз. 4-2), регулятора FIC (поз. 4-3), блоку ручного керування HSI (поз. 4-4) та перетворювача сигналу FY (поз. 4-5), який керує електричним приводом насоса М1. Номінальна витрата становить 150 кг/год з точністю підтримання $\pm 3\%$. Регулювання здійснюється зміною частоти обертання насоса через частотний перетворювач.

Контур 5 контролює температуру живильної води перед входом у першу колону за допомогою термоперетворювача Pt100 типу TE (поз. 5-1), перетворювача температури TT (поз. 5-2) та приладу індикації TI (поз. 5-3). Номінальна температура становить 20-25°C, контроль необхідний для коригування параметрів процесу дистиляції залежно від температури вихідної води.

					ЛК з 1 мп оз МЛ по 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		17

Контур 6 контролює наявність гріючої пари в системі через датчик тиску-перемикач PS (поз. 6-1), який передає дискретний сигнал (є/немає пари) до приладу сигналізації PSA (поз. 6-2). При відсутності пари більше 5 секунд спрацьовує аварійна сигналізація з блокуванням подачі живильної води та зупинкою насоса. Це запобігає роботі установки без теплоносія.

Контур 7 керує подачею гріючої пари через регулювальний клапан (поз. 7-1) з пневматичним приводом, датчик положення GE (поз. 7-2), перетворювач сигналу GY (поз. 7-3), регулятор GIC (поз. 7-4) та блок ручного керування HCI (поз. 7-5). Клапан забезпечує відсікання пари при аварійних ситуаціях. Номінальне положення 40-50% відкриття, це основний виконавчий механізм для регулювання інтенсивності процесу дистиляції.

Контур 8 контролює тиск гріючої пари після регулювального клапану і включає датчик тиску PE (поз. 8-1) з діапазоном 0-10 бар, перетворювач PT (поз. 8-2) та прилад індикації з сигналізацією PISA (поз. 8-3). Номінальний тиск становить 6,0 бар, при падінні нижче 4,5 бар спрацьовує попереджувальна сигналізація, нижче 3,0 бар – аварійна з автоматичним закриттям клапану подачі води. Контур забезпечує контроль достатності теплоносія для процесу.

Контур 9 контролює температуру гріючої пари за допомогою термоперетворювача TE (поз. 9-1) типу Pt100, перетворювача TT (поз. 9-2) та приладу індикації TI (поз. 9-3). Номінальна температура пари при тиску 6 бар становить 160-165°C. Моніторинг температури дозволяє контролювати якість пари та виявляти наявність конденсату в паропроводі.

Контур 10 контролює рівень рідини у першій випарній колоні через ємнісний датчик LS (поз. 10-1) з діапазоном 0-500 мм, перетворювач LT (поз. 10-2) та прилад сигналізації LSA (поз. 10-3). Номінальний рівень становить 300-350 мм. При падінні рівня нижче 150 мм (критично низький) спрацьовує блокування подачі пари для запобігання перегріву колони, при перевищенні 450 мм (критично високий) блокується подача живильної води для запобігання переливу. Контур забезпечує безпечну роботу першої колони.

					ЛК 3.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

Контур 11 контролює температуру пари між першою та другою колонами за допомогою термоперетворювача ТЕ (поз. 11-1), перетворювача ТТ (поз. 11-2) та приладу індикації з реєстрацією TIR (поз. 11-3). Номінальна температура становить 155-160°C в залежності від режиму роботи. При відхиленні від номінального діапазону більше ніж на $\pm 10^{\circ}\text{C}$ спрацьовує попереджувальна сигналізація, більше ніж на $\pm 15^{\circ}\text{C}$ – аварійна. Контроль температури між колонами дозволяє оцінювати ефективність тепломасообміну в першій колоні.

Контур 12 контролює наявність холодоагенту через датчик тиску-перемикач PS (поз. 12-1) та прилад сигналізації PSA (поз. 12-2). При відсутності холодоагенту більше 10 секунд спрацьовує попереджувальна сигналізація з рекомендацією зменшення подачі пари. Тривала відсутність холодоагенту може призвести до перегріву дистилляту та погіршення його якості.

Контур 13 керує подачею холодоагенту через регулювальний клапан (поз. 13-1) з електричним приводом, датчик положення GE (поз. 13-2), перетворювач GY (поз. 13-3) та блок керування. Номінальне положення клапану становить 70-80% відкриття для забезпечення достатнього охолодження дистилляту до 25-30°C.

Контур 14 контролює витрату холодоагенту через електромагнітний витратомір FE (поз. 14-1) з діапазоном 0-500 л/хв, перетворювач FT (поз. 14-2) та прилад індикації FI (поз. 14-3). Номінальна витрата становить 320 л/хв і залежить від інтенсивності процесу дистиляції. Моніторинг витрати дозволяє контролювати ефективність системи охолодження.

Контур 15 контролює температуру холодоагенту на вході в систему охолодження за допомогою термоперетворювача ТЕ (поз. 15-1), перетворювача ТТ (поз. 15-2) та приладу індикації ТІ (поз. 15-3). Номінальна температура становить 12-18°C. При підвищенні температури вище 25°C ефективність охолодження суттєво знижується і може знадобитися коригування режиму роботи установки.

Контур 16 контролює температуру пари між другою та третьою колонами через термоперетворювач ТЕ (поз. 16-1), перетворювач ТТ (поз. 16-2) та прилад індикації з реєстрацією TIR (поз. 16-3). Номінальна температура становить 105-

					ЛК з 1 мп оз МЛ по 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		19

110°C. Контроль цієї температури необхідний для правильності розподілу теплового навантаження між колонами.

Контур 17 є найважливішим контуром системи і контролює електропровідність (якість) дистиляту через прецизійний кондуктометричний датчик QE (поз. 17-1) з діапазоном 0-2 мкСм/см та точністю $\pm 0,02$ мкСм/см, перетворювач QT (поз. 17-2) та прилад індикації, реєстрації, сигналізації QIRCA (поз. 17-3). Номінальне значення електропровідності становить 0,8-1,0 мкСм/см при температурі 25°C. При перевищенні порогу 1,3 мкСм/см спрацьовує попереджувальна сигналізація, при перевищенні 1,5 мкСм/см дистилят автоматично перенаправляється в дренаж через відкриття вентиля (поз. 18-1) з датчиком GE (поз. 18-2). Цей контур безпосередньо визначає якість кінцевого продукту.

Контур 18 контролює температуру дистиляту після системи охолодження за допомогою термоперетворювача TE (поз. 18-1), перетворювача TT (поз. 18-2) та приладу індикації TI (поз. 18-3). Номінальна температура становить 25-30°C, що є оптимальним для точного вимірювання електропровідності кондуктометром. При температурі вище 35°C або нижче 20°C точність вимірювання якості знижується і потрібне коригування роботи системи охолодження.

Контур 19 керує розподілом дистиляту між накопичувальним баком та дренажем. При якості в нормі ($QE < 1,3$ мкСм/см) відкритий вентиль (поз. 19-1) з датчиком положення GE (поз. 19-2) та перетворювачем GY (поз. 19-3), який направляє дистилят в накопичувальний бак. При поганій якості цей вентиль закривається, а дистилят йде в дренаж. Цей контур забезпечує автоматичний контроль якості продукції без втручання оператора.

Контур 20 керує продувкою третьої випарної колони через регулювальний клапан (поз. 20-1) з датчиком положення GE (поз. 20-2), перетворювачем GY (поз. 20-3) та блоком ручного керування HCI (поз. 20-4). Продувка здійснюється періодично для видалення накопичених солей та забруднень з нижньої частини колони.

					ЛК з 1 мп оз МЛ по пої ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

Контур 21 контролює верхній рівень у накопичувальному баку через датчик рівня-перемикач LS (поз. 21-1) та прилад сигналізації LSA (поз. 21-2). При досягненні верхнього рівня (90% висоти бака) спрацьовує сигналізація про необхідність відбору води або зупинки процесу. Це запобігає переповненню бака та втраті продукції.

Контур 22 контролює нижній рівень у накопичувальному баку через датчик LS (поз. 22-1) та прилад сигналізації LSA (поз. 22-2). При падінні до нижнього рівня (10% висоти) спрацьовує блокування вентиля відбору для запобігання роботі системи розподілу WFI Loop на сухий хід. Цей контроль забезпечує наявність мінімального страхового запасу води в баці.

Контур 23 керує відбором води для ін'єкцій з накопичувального бака до системи розподілу (WFI Loop) через регулювальний клапан (поз. 23-1) з датчиком положення GE (поз. 23-2), перетворювачем GY (поз. 23-3) та блоком дистанційного керування. Відбір здійснюється за запитом від системи споживання. Вентиль блокується при: недостатньому рівні в баці, поганій якості дистилляту або відсутності сигналу дозволу від системи WFI Loop.

2.3. Висновок до розділу

Розроблена система автоматизації багатоколонної дистиляційної установки включає 23 контури регулювання та контролю, побудована за ієрархічним принципом на базі ПЛК SIMATIC S7-1500 з об'єднанням всіх приладів через інтерфейс RS-485 (Modbus RTU).

Ключовою особливістю системи є каскадна схема регулювання якості, в якій контур контролю електропровідності формує керуючий сигнал для регулятора подачі пари. Це забезпечує автоматичне підтримання якості води для ін'єкцій на рівні 0,8-1,0 мкСм/см. Система містить розгалужену мережу технологічних блокувань для безпечної експлуатації обладнання та автоматичного відбракування неякісного дистилляту.

					ЛК 34.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		21

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОКОЛОННОЇ ДИСТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

3.1. Моделювання статичного режиму

Розглянемо структурно-параметричну (рис. 3.1) схеми багатоколонної дистиляційної установки.

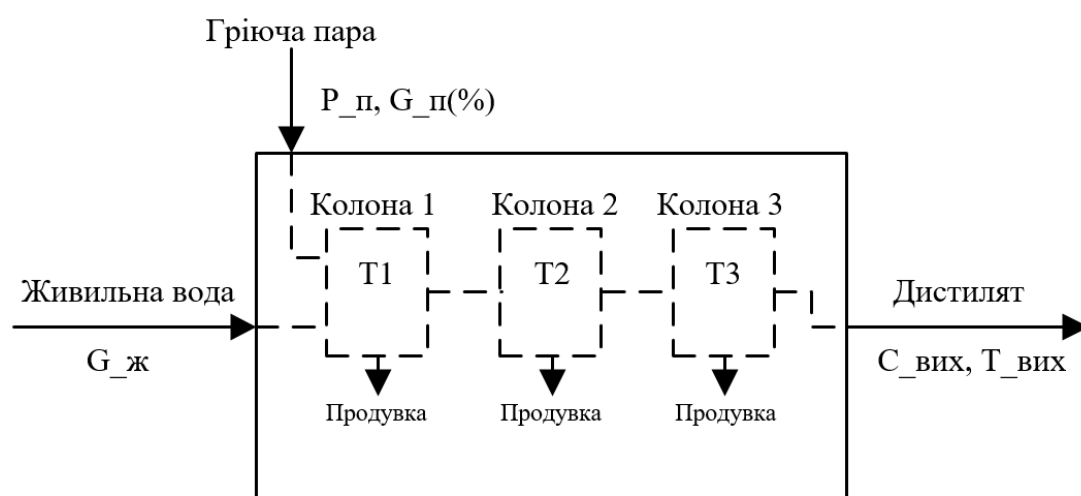


Рисунок 3.1 – Структурно-параметрична схема багатоколонної дистиляційної установки

Основним каналом керування є: «положення клапану пари (%)» «електропровідність дистиляту ($\mu\text{S}/\text{cm}$)». Керуючою дією є положення клапану подачі пари, регульованою величиною – електропровідність дистиляту, а збуренням – температура живильної води, електропровідність живильної води.

При збільшенні подачі пари (відкритті клапану) температура в першій колоні зростає:.

$$T_1 = T_{1_{\text{ном}}} + k_{T_1} \cdot (u - u_{\text{ном}}) \quad (3.1)$$

де $T_{1_{\text{ном}}} = 118^\circ\text{C}$ – номінальна температура при $u_{\text{ном}} = 45\%$, $k_{T_1} \approx 0,3 \frac{^\circ\text{C}}{\%}$ – коефіцієнт передачі (визначається експериментально).

					ЛК 3.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		22

Таблиця 3.1 – Технологічні параметри дистиляційної установки

№ п/п	Назва параметру	Позначення	Значення	Одиниці виміру
1	2	3	4	5
1	Витрата живильної води	$G_{ж}$	150	$кг / год$
2	Продуктивність	$G_{д}$	100	$кг / год$
3	Тиск пари на вході	$P_{пара}$	4,5	бар
4	Положення клапану пари	u	45	%
5	Температура в колоні 1	T_1	160	$^{\circ}C$
6	Температура в колоні 2	T_2	120	$^{\circ}C$
7	Температура в колоні 3	T_3	90	$^{\circ}C$
8	Температура дистиляту	$T_{вих}$	80	$^{\circ}C$
9	Електропровідність дистиляту	$C_{вих}$	0,82	$\mu S / см$
10	Макс. допустима електропровідність	C_{max}	1,1	$\mu S / см$
11	Об'єм колони	V	30	л
12	Питома теплоємність води	C_{ϵ}	4,187	$\frac{кДж}{кг \cdot K}$

Температури в наступних колонах залежать від T_1 :

$$T_2 = T_1 - \Delta T_{12} \quad (3.2)$$

$$T_3 = T_2 - \Delta T_{23} \quad (3.3)$$

де $\Delta T_{12} \approx 15^{\circ}C$, $\Delta T_{23} \approx 13^{\circ}C$ – перепади температур між колонами.

Якість очищення води в дистиляційній установці залежить від інтенсивності випаровування, яка визначається температурним режимом. Емпірична залежність:

$$C_{вих} = C_{ж} \cdot K_{очищення} \quad (3.4)$$

де $C_{ж}$ – електропровідність живильної води, $K_{очищення}$ – коефіцієнт очищення (ступінь зниження електропровідності).

					ЛК 3.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

Коефіцієнт очищення залежить від середньої температури в колонах:

$$K_{\text{очищення}} = \exp(-\alpha \cdot T_{\text{сер}}) \quad (3.5)$$

$$T_{\text{сер}} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \quad (3.6)$$

де $\alpha \approx 0,025 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – емпіричний коефіцієнт.

При типових значеннях $T_{\text{сер}} = 104 \text{ } ^\circ\text{C}$ та $C_{\text{ж}} = 5 \frac{\mu\text{S}}{\text{см}}$:

$$K_{\text{очищення}} = \exp(-0,025 \cdot 104) \approx 0,074$$

$$C_{\text{вих}} = 5 \cdot 0,074 \approx 0,37 \frac{\mu\text{S}}{\text{см}}$$

Об'єднуючи рівняння (3.1)–(3.6), отримуємо статичну характеристику:

$$C_{\text{вих}} = f(u, C_{\text{ж}}) = C_{\text{ж}} \cdot \exp(-\alpha \cdot T_{\text{сер}}(u)) \quad (3.7)$$

3.1.1. Побудова статичної характеристики

Розглянемо залежність $C_{\text{вих}} = f(u)$ при постійній $C_{\text{ж}} = 5 \frac{\mu\text{S}}{\text{см}}$:

Таблиця 3.2 - Залежність $C_{\text{вих}} = f(u)$ при постійній $C_{\text{ж}} = 5 \frac{\mu\text{S}}{\text{см}}$.

№	u , %	T_1 , $^\circ\text{C}$	T_2 , $^\circ\text{C}$	T_3 , $^\circ\text{C}$	$T_{\text{сер}}$, $^\circ\text{C}$	$K_{\text{очищення}}$	$C_{\text{вих}}$, $\frac{\mu\text{S}}{\text{см}}$
1	30	113,5	98,5	85,5	99,2	0,084	0,42
2	35	115,0	100,0	87,0	100,7	0,081	0,41
3	40	116,5	101,5	88,5	102,2	0,078	0,39
4	45	118,0	103,0	90,0	103,7	0,075	0,37
5	50	119,5	104,5	91,5	105,2	0,072	0,36
6	55	121,0	106,0	93,0	106,7	0,069	0,35
7	60	122,5	107,5	94,5	108,2	0,067	0,33

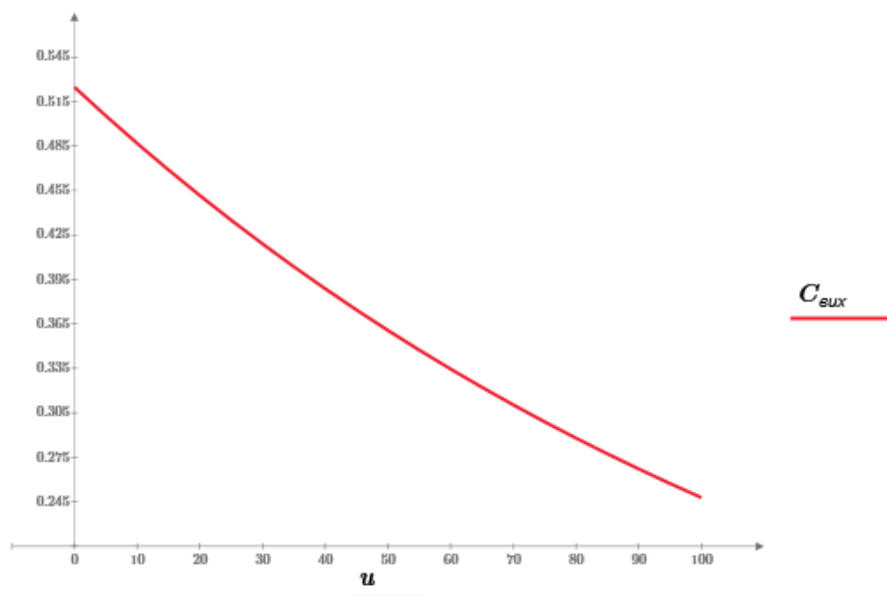


Рисунок 3.2 – Статична характеристика залежності електропровідності дистилляту від положення клапану пари

Зі збільшенням подачі пари (відкриття клапану) електропровідність дистилляту зменшується через інтенсивніше випаровування та кращу сепарацію домішок. Це є збурюючим каналом для системи керування.

3.2. Моделювання динамічного режиму

Для моделювання динамічного режиму необхідно врахувати акумулюючі властивості колон. Матеріальний баланс з урахуванням накопичення (для колони з індексом $i = 1, 2, 3$):

$$G_{i-1} - G_{i_{\text{продукта}}} - G_{i_{\text{пара}}} = V_i \cdot \rho_s \cdot \frac{dh_i}{dt} \quad (3.8)$$

Тепловий баланс:

$$Q_i - G_{i_{\text{продукта}}} \cdot C_s \cdot T_i - G_{i_{\text{пара}}} \cdot (C_s \cdot T_i + r) = M_i \cdot C_s \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad (3.9)$$

де Q_i – теплопідвід в колону i , кВт; r – теплота пароутворення, кДж/кг; M_i – маса води в колоні, кг.

					ЛК 34.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

Для першої колони Q_1 визначається паром:

$$Q_1 = G_{пара}(u) \cdot r_{пара} \quad (3.10)$$

$$G_{пара}(u) = G_{пара_{max}} \cdot \frac{u}{100} \quad (3.11)$$

Лінеаризуємо систему рівнянь (3.8) – (3.11) навколо робочої точки:

$$T_1 \cdot \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = k_1 \cdot \Delta u \quad (3.12)$$

$$T_2 \cdot \frac{d\Delta T_2}{dt} + \Delta T_2 = k_2 \cdot \Delta T_1 \quad (3.13)$$

$$T_3 \cdot \frac{d\Delta T_3}{dt} + \Delta T_3 = k_3 \cdot \Delta T_2 \quad (3.14)$$

Визначаємо зв'язок з електропровідністю диференціюючи (3.7):

$$T_{сер} \cdot \frac{d\Delta C_{вих}}{dt} + \Delta C_{вих} = k_c \cdot \Delta T_{сер} \quad (3.15)$$

$$\Delta T_{сер} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3}{3} \quad (3.16)$$

Визначаємо параметри моделі. Постійні часу (визначаються з теплової інерції колон):

$$T_1 = M_1 \cdot \frac{C_s}{G_{пара} \cdot \frac{r_{пара}}{\Delta T_1}} \approx 180 \text{ c}$$

$$T_2 \approx 150 \text{ c}$$

$$T_3 \approx 120 \text{ c}$$

$$T_{сер} \approx 60 \text{ c}$$

					ЛК зм. 1 мп о з МЛ оо оо1 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

Коефіцієнти передачі:

$$k_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta u} = 0,3$$

$$k_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = 0,95$$

$$k_3 = \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} = 0,92$$

$$k_{сер} = \frac{\Delta C_{вих}}{\Delta T_{сер}} = -0,0093$$

Визначаємо передавальні функції. Для визначення передавальної функції для каналу керування «положення клапану – електропровідність» застосовуємо перетворення Лапласа до (3.12) – (3.16):

$$W_{керування}(s) = \frac{C_{вих}(s)}{u(s)} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_{сер} \cdot \frac{1}{3}}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)(T_3 \cdot s + 1)(T_{сер} \cdot s + 1)}$$

Підставляючи числові значення:

$$W_{керування}(s) = \frac{-0,00081}{(180s + 1)(150s + 1)(120s + 1)(60s + 1)} \quad (3.17)$$

Від'ємний коефіцієнт підтверджує, що збільшення подачі пари зменшує електропровідність.

Визначаємо передавальну функцію для каналу збурення «електропровідність живильної води – електропровідність дистилляту». З рівняння (3.4):

$$W_{збурення}(s) = \frac{C_{вих}(s)}{C_{ж}(s)} = \frac{K_{очищення}}{(T_{сер} \cdot s + 1)} \quad (3.18)$$

$$W_{збурення}(s) = \frac{0,075}{(60s + 1)} \quad (3.19)$$

Перехідна характеристика каналу керування (при стрибкоподібній зміні u на +5%):

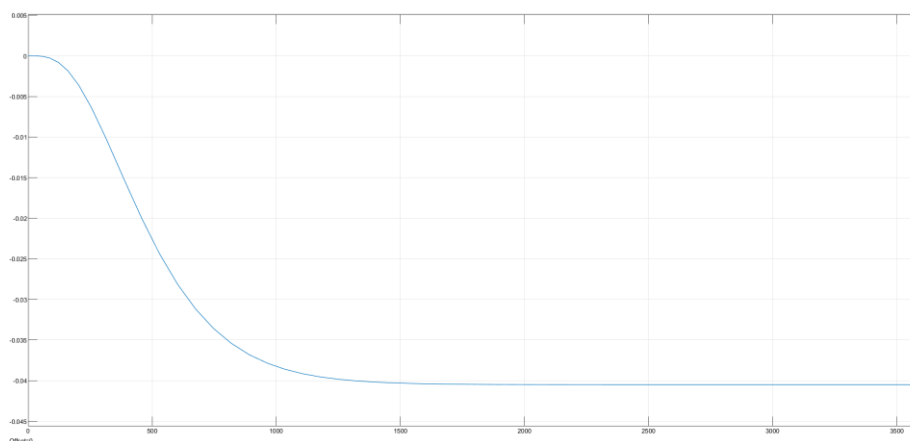


Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика каналу «положення клапану – електропровідність»

Параметри перехідного процесу:

- Час регулювання $t_p \approx 1800$ с ;
- Перерегулювання $\sigma \approx 5\%$;
- Аперіодичний.

Перехідна характеристика каналу збурення (при стрибкоподібній зміні $C_{Ж}$ на $+1 \frac{\mu S}{cm}$):

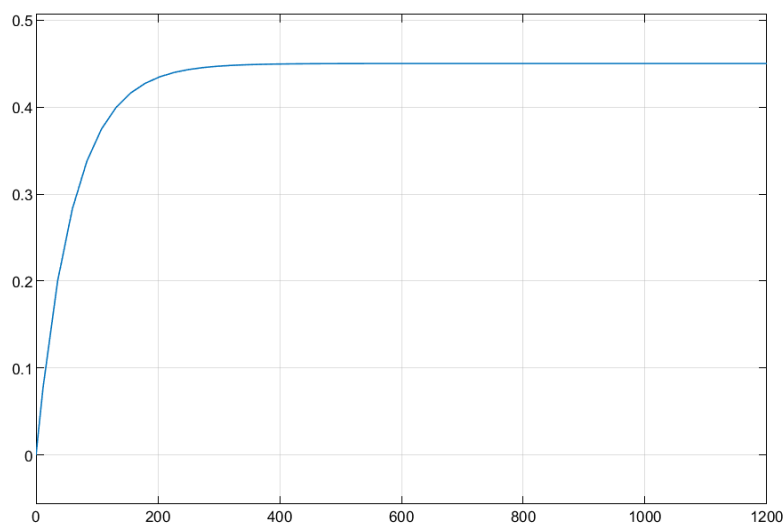


Рисунок 3.4 – Перехідна характеристика каналу збурення

Параметри перехідного процесу:

- Час регулювання $t_p \approx 400$ с ;
- Перерегулювання $\sigma \approx 0\%$;
- Аперіодичний.

Отже, об'єкт має високу інерційність (близько 30 хвилин), що обумовлено тепловою інерцією колон та часом транспортування дистилляту до датчика електропровідності.

3.3. Синтез ПД регулятора системи керування багатоколонної дистиляційної установки

Для дослідження були вибрані наступні регулятори: ПІ, ПД та ПІД. Для розв'язання поставленої задачі був застосований математичний пакет *Matlab*. Для дослідження засобами *Simulink* було побудовано декілька моделей системи керування з регуляторами, що різнилися законами керування. Система керування включає в себе передавальну функцію об'єкта керування, ланку транспортного запізнення, блок завдання та блок ПІ/ПД/ПІД-регулятора (рис. 3.5).

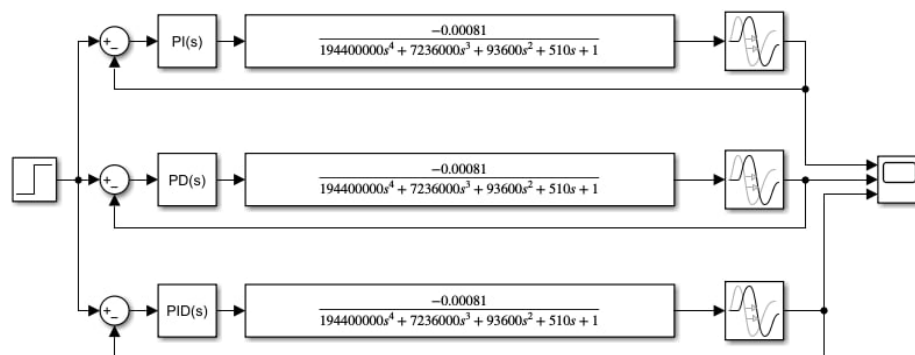


Рисунок 3.5 – Структурна схема системи в *Simulink* з ПІ, ПД та ПІД-регулятором

В *Matlab* є вбудований засіб *PID Tuning Toolbox*, за допомогою якого відбувається налаштування регуляторів різних типів. Цей інструмент дозволяє налаштовувати регулятори в ручному та автоматичному режимі та будувати перехідні характеристики. Щоб налаштувати регулятор, необхідно натиснути на блок регулятора, після чого відкриється вікно налаштувань, у якому можна вибрати

тип регулятора (PI, PD або PID), спосіб його підключення та інші параметри. У вікні є кнопка «Tune», після її натиснення відкривається нове вікно з перехідною характеристикою з врахуванням автоматично підібраних параметрів. Зверху вікна є перемикачі «Response Time» та «Transient Behavior», за допомогою яких можна впливати на параметри налаштування. Перехідна характеристика перераховується заново і будується поряд із автоматично налаштованою.

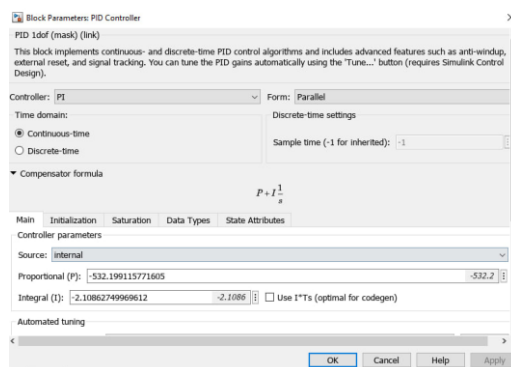


Рисунок 3.6 – Блок ПІ-регулятора

Для порівняння ПІ, ПД та ПІД-регуляторів побудуємо перехідні характеристики замкненої системи за каналом керування з врахуванням раніше отриманих параметрів регуляторів на одному графіку (рис. 3.7). В таблиці 3.3 показані показники якості перехідного процесу для порівняння усіх трьох типів регуляторів.

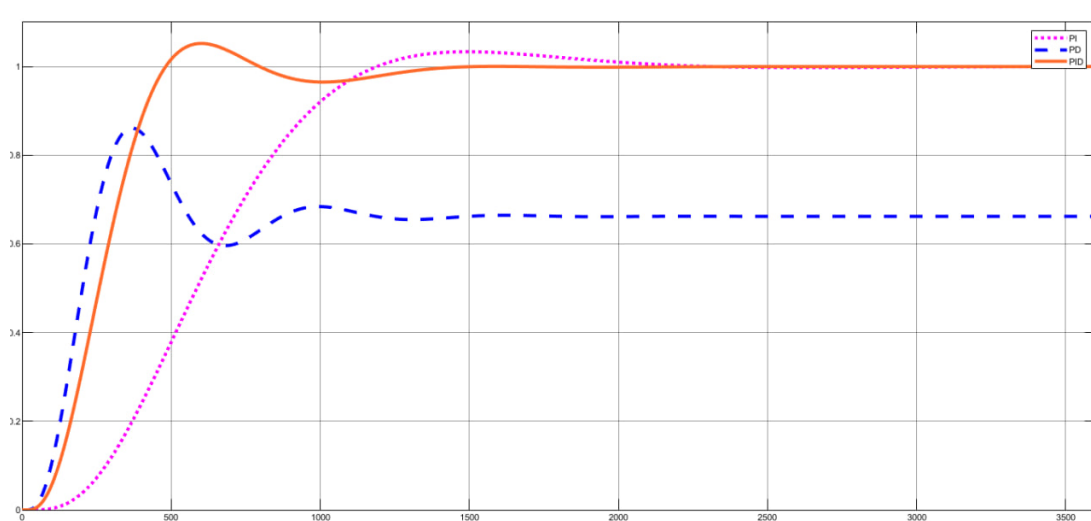


Рисунок 3.7 – Перехідна характеристика системи керування з ПІ, ПД, ПІД -регулятором

Таблиця 3.3 – Показники якості перехідного процесу

Показник	Значення		
	PI	PD	PID
Час виходу на усталений режим, с	3492	1865	2087
Перерегулювання, %	3,3	30,1	5,2
Час підйому, с	685	188	287
Час встановлення перехідного процесу (5%), с	1056	796	632
P	-532,20	-2419,58	-2048,23
I	-2,11	-	-4,67
D	-	-445348,22	-219957,05

За результатом порівняння та аналізу якості перехідного режиму можна зробити наступні висновки:

- ПІ-регулятор забезпечує низьке перерегулювання та відсутність статичної похибки, проте має повільну реакцію на збурення;
- ПД-регулятор має найшвидший час підйому, проте цей регулятор не забезпечує нульової статичної похибки, що неприйнятно для даного процесу;
- ПІД-регулятор демонструє оптимальне співвідношення швидкодії та якості регулювання, поєднуючи переваги обох попередніх типів.

Отже, для системи керування багатоколонною дистиляційною установкою рекомендується використовувати ПІД-регулятор з параметрами, наведеними в табл. 3.3.

3.4. Синтез нечіткого регулятора системи керування багатоколонної дистиляційної установки

Процес дистиляційного очищення води для ін'єкцій є досить складним з точки зору математичного опису системи, тому доцільно застосувати нечіткі експертні системи, які використовують емпіричні знання фахівців щодо вироблення керувальних впливів при варіюванні керованих змінних.

Створення нечіткої системи керування для багатоколонної дистиляційної установки має ряд обґрунтувань, основні з яких включають:

					ЛК 34.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		31

1) Процес дистиляції включає в себе багато взаємопов'язаних фізико-хімічних параметрів: температури в трьох колонах (160°C , 120°C , 90°C), тиск пари (4,5 бар), рівні води в колонах, електропровідність вхідної та вихідної води. Врахування всіх можливих взаємозв'язків та динаміки процесу за допомогою точних математичних моделей є складним завданням.

2) Статична характеристика залежності електропровідності від положення клапану має експоненціальний характер. Нелінійність посилюється через каскадне з'єднання трьох колон з різними температурними режимами.

3) З аналізу перехідних процесів видно, що час регулювання становить близько 30 хвилин. Така велика постійна часу ускладнює традиційне ПД-регулювання і робить систему чутливою до налаштувань регулятора.

4) У процесі експлуатації дистиляційної установки оператори накопичили значний досвід керування. Нечіткі системи дозволяють використовувати цю емпіричну інформацію для побудови моделей та прийняття рішень у вигляді лінгвістичних правил типу «ЯКЩО електропровідність висока, ТО збільшити подачу пари».

Структура нечіткої системи керування для дистиляційної установки побудована на основі визначених величин:

- 1) вхідне відхилення електропровідності дистиляту від заданого значення (ΔC) ;
- 2) вхідна швидкість зміни електропровідності $\left(\frac{dC}{dt}\right)$;
- 3) вихідна корекція положення клапану пари (Δu).

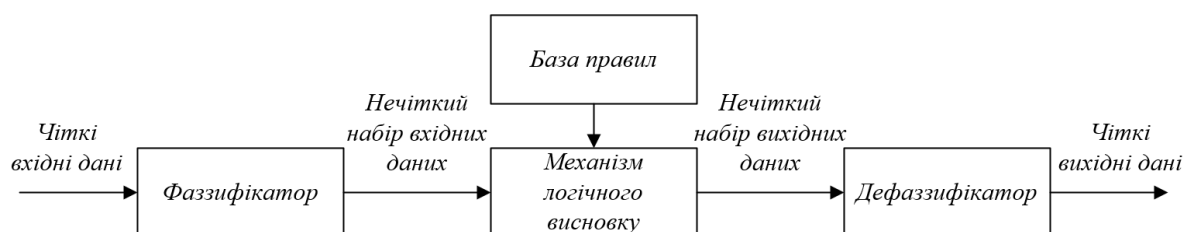


Рисунок 3.8 – Структурна схема нечіткої системи керування

3.4.1. Вибір та опис лінгвістичних змінних

Відповідно до структури системи визначаємо лінгвістичні змінні.

Вхідна лінгвістична змінна А (відхилення електропровідності):

$\langle \text{Відхилення електропровідності; Від'ємне / Нульове / Додатне; } -0,3 \leq \Delta C \leq 0,3 \rangle$

$$\text{де } \Delta C = C_{\text{вих}} - C_{\text{задане}}, C_{\text{задане}} = 0,82 \frac{\text{мкСм}}{\text{см}}$$

Вхідна лінгвістична змінна Б (швидкість зміни електропровідності):

$\langle \text{Швидкість змін; Спадає / Стабільна / Зростає; } -0,01 \leq \frac{dC}{dt} \leq 0,01 \rangle$

Вихідна лінгвістична змінна В (корекція клапану):

$\langle \text{Корекція клапану; Зменшити / Залишити / Збільшити; } -10 \leq \Delta u \leq 10 \rangle$

де Δu – зміна положення клапану в %.

3.4.2. Створення нечіткої математичної моделі об'єкта керування та правил продукції

Створення функцій належності виконується в ПК *MatLab Fuzzy Logic Toolbox* (рис. 3.9). В *FIS Editor* налаштовано:

- *And method: min*
- *Or method: max*
- *Implication: min*
- *Aggregation: max*
- *Defuzzification: centroid* (метод центру ваги)

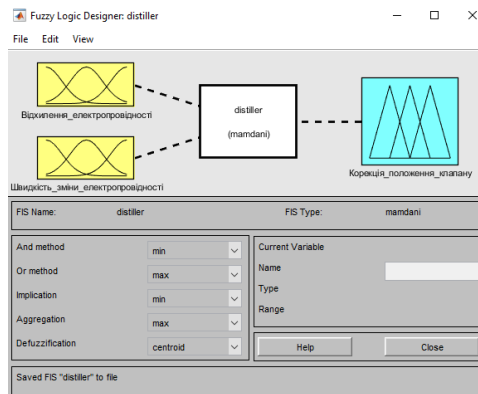


Рисунок 3.9 – Вікно *FIS Editor* з двома входами та одним виходом

Функції належності для вхідної змінної 1 (ΔC).

Функція належності – Від’ємне (електропровідність нижче норми):

$$\mu_{\Delta C \text{ від'ємне}}(\Delta C) = \begin{cases} 1, & \Delta C \leq -0,15 \\ \frac{-0,05 - \Delta C}{-0,05 - (-0,15)}, & -0,15 < \Delta C < -0,05 \\ 0, & \Delta C \geq -0,05 \end{cases}$$

Функція належності – Нульове (норма):

$$\mu_{\Delta C \text{ нульове}}(\Delta C) = \begin{cases} 0, & \Delta C \leq -0,1 \text{ або } \Delta C \geq 0,1 \\ \frac{\Delta C - (-0,1)}{0 - (-0,1)}, & -0,1 < \Delta C < 0 \\ \frac{0,1 - \Delta C}{0,1 - 0}, & 0 < \Delta C < 0,1 \\ 1, & \Delta C = 0 \end{cases}$$

Функція належності – Додатне (електропровідність вище норми):

$$\mu_{\Delta C \text{ додатне}}(\Delta C) = \begin{cases} 1, & \Delta C \geq 0,15 \\ \frac{\Delta C - 0,05}{0,15 - 0,05}, & 0,05 < \Delta C < 0,15 \\ 0, & \Delta C \leq 0,05 \end{cases}$$

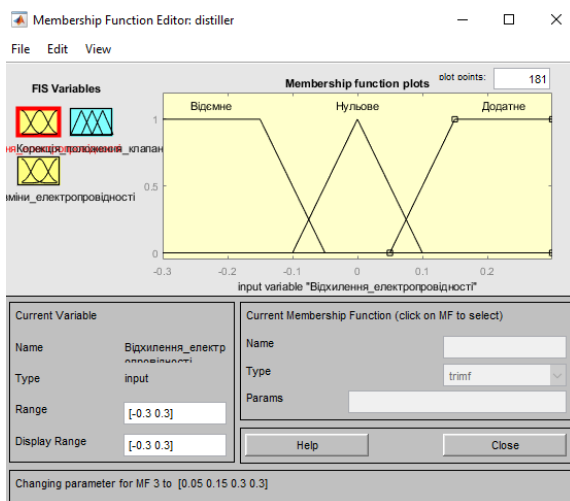


Рисунок 3.10 – Поєднання всіх трьох функцій належності для ΔC

Функції належності для вхідної змінної 2 $\left(\frac{dC}{dt} \right)$.

Функція належності – Спадає:

$$\mu_{\frac{dC}{dt} \text{ спадає}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq -0,005 \\ \frac{-0,002 - x}{-0,002 - (-0,005)}, & -0,005 < x < -0,002 \\ 0, & x \geq -0,002 \end{cases}$$

Функція належності – Стабільна:

$$\mu_{\frac{dC}{dt} \text{ стабільна}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -0,004 \text{ або } x \geq 0,004 \\ \frac{x - (-0,004)}{0 - (-0,004)}, & -0,004 < x < 0 \\ \frac{0,004 - x}{0,004 - 0}, & 0 \leq x < 0,004 \\ 1, & x = 0 \end{cases}$$

Функція належності – Зростає:

$$\mu_{\frac{dC}{dt} \text{ зростає}}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0,005 \\ \frac{x - 0,002}{0,005 - 0,002}, & 0,002 < x < 0,005 \\ 0, & x \leq 0,002 \end{cases}$$

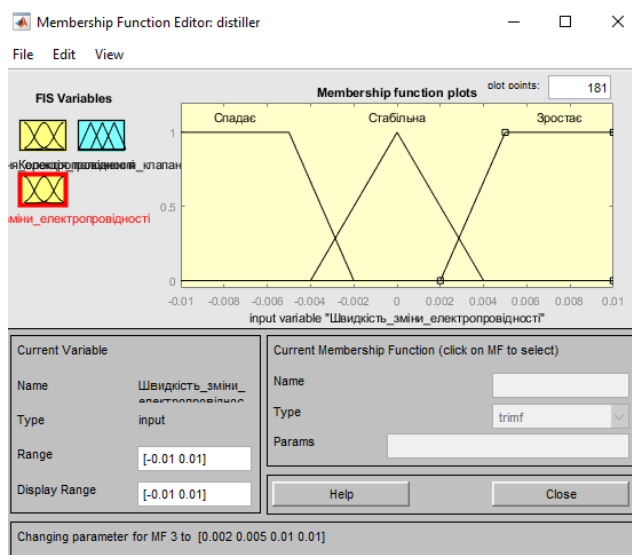


Рисунок 3.11 – Поєднання всіх трьох функцій належності для $\frac{dC}{dt}$

Функції належності для вихідної змінної (Δu).

Функція належності – Зменшити (закрити клапан):

$$\mu_{\Delta u \text{ зменшити}}(u) = \begin{cases} 1, & u \leq -5 \\ \frac{-2-u}{-2-(-5)}, & -5 < u < -2 \\ 0, & x \geq -2 \end{cases}$$

Функція належності – Залишити (без змін):

$$\mu_{\Delta u \text{ залишити}}(u) = \begin{cases} 0, & u \leq -3 \text{ або } u \geq 3 \\ \frac{u-(-3)}{0-(-3)}, & -3 < u < 0 \\ \frac{3-u}{3-0}, & 0 \leq u < 3 \\ 1, & u = 0 \end{cases}$$

Функція належності – Збільшити (відкрити клапан):

$$\mu_{\Delta u \text{ збільшити}}(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 5 \\ \frac{x-2}{5-2}, & 2 < u < 5 \\ 0, & x \leq 2 \end{cases}$$

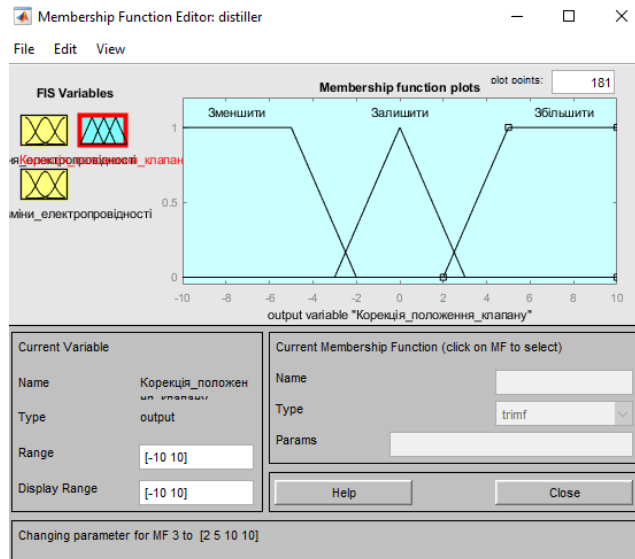


Рисунок 3.12 – Поєднання всіх функцій для Δu

Сформуємо базу правил на основі експертних знань (табл. 3.4). Цю таблицю правил логіки можна пояснити наступним чином:

- Якщо електропровідність нижче норми (вода занадто чиста) – зменшуємо пару.
- Якщо електропровідність вище норми (погана очистка) – збільшуємо пару.
- Якщо процес йде в потрібному напрямку – не втручаємось.

Таблиця 3.4 – Матриця правил нечіткого висновку

№	ЯКЩО ΔC	$I \frac{dC}{dt}$	ТО Δu
1	Від’ємне	Спадає	Зменшити
2	Від’ємне	Стабільна	Зменшити
3	Від’ємне	Зростає	Залишити
4	Нульове	Спадає	Залишити
5	Нульове	Стабільна	Залишити
6	Нульове	Зростає	Залишити
7	Додатне	Спадає	Залишити
8	Додатне	Стабільна	Збільшити
9	Додатне	Зростає	Збільшити

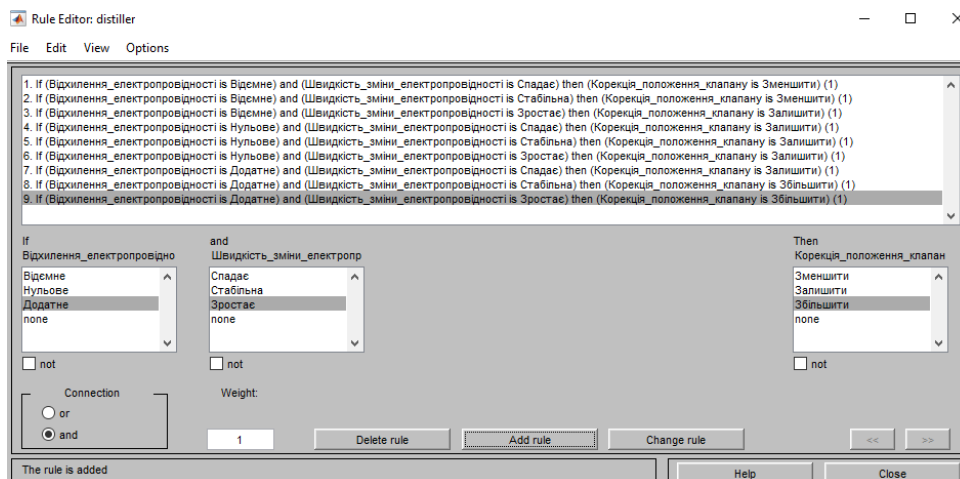


Рисунок 3.13 – Вікно *Rule Editor* з усіма 9 правилами

Для перевірки роботи обираємо для дослідження ситуацію: $\Delta C = 0,15 \frac{\text{мкСм}}{\text{см}}$

(електропровідність вище норми на 0,15), $\frac{dC}{dt} = 0,003$ (повільно зростає).

Визначаємо ступені входження для $\Delta C = 0,15$:

$$\mu_{\Delta C \text{ від'ємне}}(0,15) = 0$$

$$\mu_{\Delta C \text{ нульове}}(0,15) = 0$$

$$\mu_{\Delta C \text{ додатне}}(0,15) = 1$$

Визначаємо ступені входження для $\frac{dC}{dt} = 0,003$:

$$\mu_{\frac{dC}{dt} \text{ спадає}}(0,003) = 0$$

$$\mu_{\frac{dC}{dt} \text{ стабільна}}(0,003) = 0,33$$

$$\mu_{\frac{dC}{dt} \text{ зростає}}(0,003) = 0,67$$

Маємо активні правила:

- Правило 8: ЯКЩО $\Delta C = \text{Додатне}$ І $\frac{dC}{dt} = \text{Стабільна}$ ТО $\Delta u = \text{Збільшити}$ (вага 0,33)
- Правило 9: ЯКЩО $\Delta C = \text{Додатне}$ І $\frac{dC}{dt} = \text{Зростає}$ ТО $\Delta u = \text{Збільшити}$ (вага 0,67)

Використовуючи метод мінімуму для модифікації правил:

$$\mu_{\Delta u \text{ збільшити } 8}(\Delta u) = \min(1; 0,33) \cdot \mu_{\Delta u \text{ збільшити } 8}(\Delta u) = 0,33 \cdot \mu_{\Delta u \text{ збільшити } 8}(\Delta u)$$

$$\mu_{\Delta u \text{ збільшити } 9}(\Delta u) = \min(1; 0,67) \cdot \mu_{\Delta u \text{ збільшити } 9}(\Delta u) = 0,67 \cdot \mu_{\Delta u \text{ збільшити } 9}(\Delta u)$$

Для врахування дії обох правил використовуємо метод об'єднання (максимум):

$$\mu_{\Delta u \text{ результат}}(\Delta u) = \max(\mu_{\Delta u \text{ збільшити } 8}(\Delta u), \mu_{\Delta u \text{ збільшити } 9}(\Delta u))$$



Рисунок 3.14 – Вікно *Rule Viewer* для вхідних значень $\Delta C = 0,15$, $\frac{dC}{dt} = 0,003$,

показує вихідне значення Δu

Дефазифікація методом центру ваги:

$$\Delta u = \frac{\int \Delta u \cdot \mu_{\Delta u \text{ результат}}(\Delta u) d(\Delta u)}{\int \mu_{\Delta u \text{ результат}}(\Delta u) d(\Delta u)} \approx 6\%$$

Отже, при електропровідності вище норми на 0,15 мкСм/см та тенденції до зростання, система рекомендує збільшити положення клапану на 6,29% для збільшення подачі пари та покращення очистки (рис. 3.14).

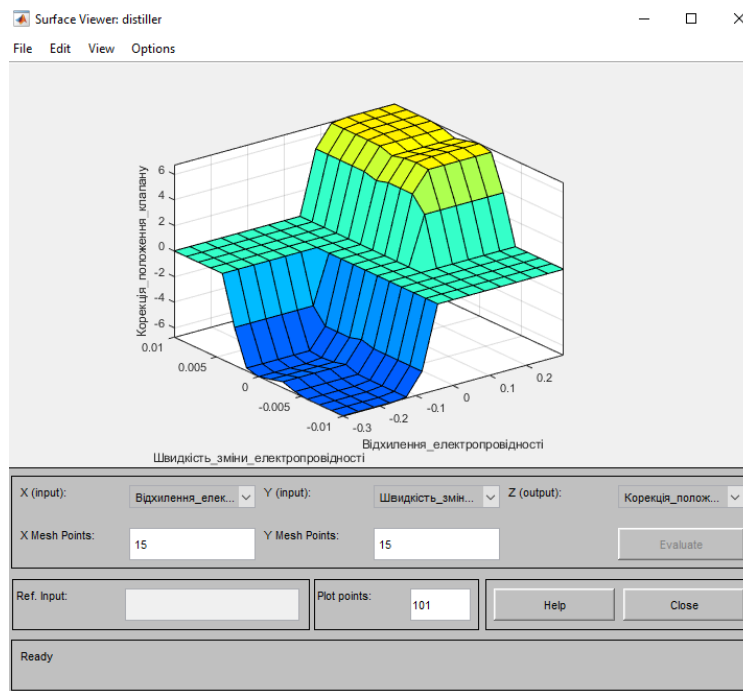


Рисунок 3.15 – Вікно *Surface Viewer*: тривимірна поверхня залежності Δu від ΔC

$$\text{та } \frac{dC}{dt}$$

На поверхні видно:

- Плавні переходи між рішеннями (без стрибків);
- Симетричність відносно нульових значень;
- Найбільша корекція при великих відхиленнях і відповідній динаміці.

3.5. Порівняння контурів з ПІД та нечітким регулятором

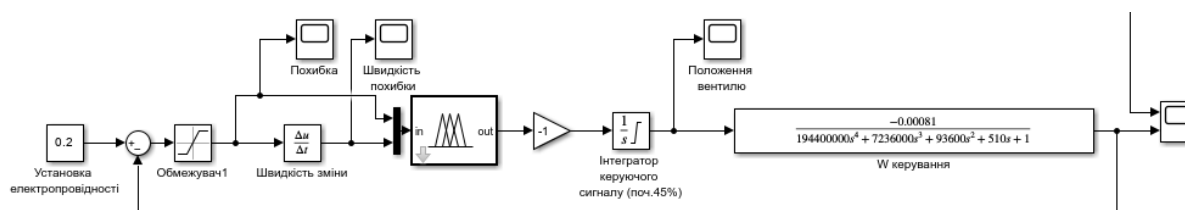


Рисунок 3.16 – Структурна схема системи в *Simulink* з *Fuzzy Logic* регулятором

Результати моделювання показали, що обидві системи успішно стабілізують електропровідність дистилляту на заданому рівні, але мають різний характер перехідних процесів.

ПІД-регулятор (червона крива) демонструє класичну поведінку з перерегулюванням. Таке перерегулювання на реальному виробництві означало б, що електропровідність спочатку падає нижче установки, що не є критичним, але свідчить про надмірну витрату пари та енергії.

Нечіткий регулятор (синя крива) має аперіодичний перехідний процес без перерегулювання. Система плавно наближається до заданого значення без різких змін параметрів, що означає менше навантаження на обладнання, відсутність циклічних температурних напружень у колонах і більш стабільне споживання пари.

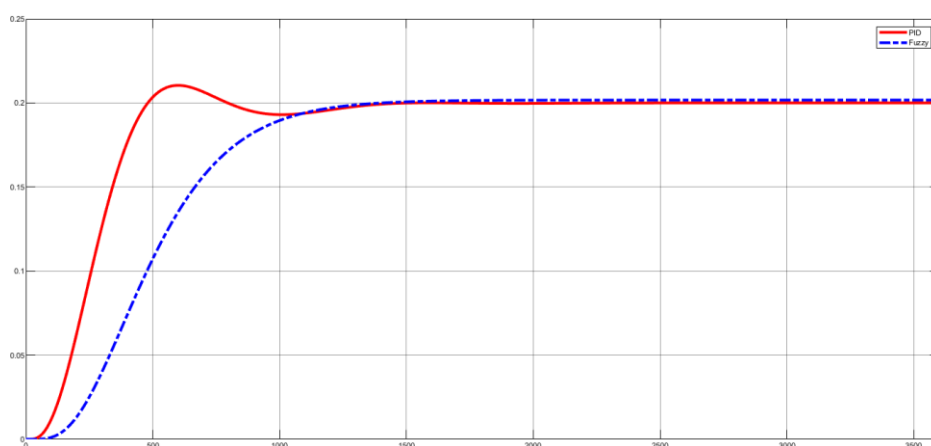


Рисунок 3.17 - Графік перехідного процесу з ПІД-регулятором та *Fuzzy Logic* регулятором

Таблиця 3.5 – Порівняльна таблиця показників якості

Показник	ПІД-регулятор	Нечітке керування
Час регулювання, с	439	1007
Перерегулювання, %	5,2	0
Характер процесу	Коливальний	Аперіодичний
Стійкість до збурень	Середня	Висока
Складність налаштування	Низька	Середня

3.6. Висновок до розділу

У цьому розділі було проведено комплексне математичне моделювання багатоколонної дистиляційної установки та синтезовано дві системи керування.

При моделюванні статичного режиму було встановлено нелінійну залежність електропровідності дистиляту від положення клапану подачі пари. Побудована статична характеристика показала, що при збільшенні відкриття клапану з 30% до 60% електропровідність знижується з 0,42 до 0,33 мкСм/см за експоненціальним законом. Коефіцієнт передачі каналу керування становить приблизно $k_T \approx 0,3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$, що вказує на слабкий безпосередній вплив положення клапану на кінцевий результат через каскадне з'єднання трьох колон.

Математичне моделювання динамічного режиму на основі матеріального та теплового балансів дало змогу визначити ключові параметри об'єкта. Враховуючи постійні часу колон, можна зробити висновок, що система має дуже високу інерційність. Передавальна функція каналу керування має четвертий порядок з від'ємним коефіцієнтом передачі -0,00081, що логічно, адже збільшення пари покращує очищення і зменшує електропровідність. Час регулювання в розімкнутій системі становить близько 1800 секунд (30 хвилин) з невеликим перерегулюванням 5%.

Синтез ПІД-регулятора демонструє оптимальне співвідношення швидкодії та якості регулювання, порівняно з ПІ та ПД регуляторами. Оптимальними для цієї системи є коефіцієнти $K_p \approx -2050$, $K_I \approx -4,67$, $K_D \approx -220000$. Моделювання замкнутого контуру показало, що регуляр справляється зі стабілізацією електропровідності на заданому рівні, але має невелике перерегулювання $\approx 5\%$ і коливальний характер перехідного процесу з часом регулювання ≈ 630 секунд.

Розроблена в *MatLab Fuzzy Logic Toolbox* нечітка система керування базується на двох вхідних змінних (відхилення електропровідності ΔC та швидкість її зміни $\frac{dC}{dt}$) і одній вихідній (корекція положення клапану Δu). Для кожної змінної було побудовано по три функції належності трапецієподібної та трикутної форми. База знань містить 9 продукційних правил типу Мамдані, які формалізують експертні знання операторів установки.

					ЛК зм. 1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		42

Порівняльне моделювання двох систем виявило суттєві відмінності. ПІД-регулятор швидший (час регулювання на $\approx 50\%$ менший), але має перерегулювання $\approx 5\%$ і коливальний характер процесу, що небажано для фармацевтичного обладнання. Нечіткий регулятор забезпечує аперіодичний процес без перерегулювання взагалі, хоча і повільніше виходить на режим (≈ 1000 секунд). Головна перевага нечіткої системи – стійкість до збурень та плавність керування, що дає економію пари через відсутність коливань. Для об'єкта з такою високою інерційністю відсутність перерегулювання важливіша за швидкодію, тому нечітке керування є більш придатним для практичного впровадження.

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		43

4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ

4.1. Загальні відомості про SCADA-системи

SCADA-системи (скорочення від англійського Supervisory Control And Data Acquisition, що перекладається як «Системи диспетчерського керування та збору даних») представляють собою спеціалізовані програмно-апаратні комплекси, які забезпечують збір, передачу, обробку та відображення інформації про технологічні процеси в режимі реального часу.

У фармацевтичній промисловості SCADA-системи відіграють особливо важливу роль, оскільки виробництво лікарських засобів вимагає суворого дотримання стандартів GMP (Good Manufacturing Practice) та забезпечення повної простежуваності всіх технологічних параметрів.

SCADA-системи встановлюються на персональні комп'ютери або промислові робочі станції, які використовуються операторами та інженерами технологічних процесів. Для зв'язку з обладнанням та технологічним об'єктом система використовує драйвери введення/виводу, OPC-сервери (OLE for Process Control) або протоколи промислової автоматизації, такі як Modbus TCP/IP, Profinet.

Основними складовими SCADA-системи є:

- Датчики та виконавчі механізми;
- Програмовані логічні контролери (ПЛК/PLC), що забезпечують первинну обробку сигналів та виконання алгоритмів керування в режимі реального часу;
- Віддалені термінали (RTU), що використовуються для збору даних з територіально розподілених об'єктів;
- Комунікаційна інфраструктура, що включає промислові мережі Ethernet, польові шини, бездротові канали зв'язку;
- HMI (Human-Machine Interface) – людино-машинний інтерфейс, який забезпечує візуалізацію процесу та взаємодію оператора з системою;

					ЛК 3.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		44

- Сервер бази даних для архівування історичних даних та генерацію звітів.

Основні функції та завдання SCADA-системи у виробництві включають:

- збір даних з датчиків температури, тиску, витрати, рівня та електропровідності в режимі реального часу;
- обробка даних та розрахунок похідних параметрів (теплові баланси, ефективність дистиляції);
- візуалізація технологічної схеми багатоколонної дистиляційної установки з відображенням поточних значень параметрів;
- архівування даних для забезпечення простежуваності відповідно до вимог GMP;
- контроль аварійних ситуацій та сигналізація при відхиленні параметрів від допустимих меж;
- формування звітів про якість продукту та хід технологічного процесу;
- передача даних на верхні рівні АСУ ТП (MES/ERP системи) для інтеграції з корпоративними системами управління.

4.2. Можливості Ignition SCADA для розробки мнемонічної схеми технологічного об'єкту керування

Ignition – це сучасна промислова платформа SCADA/HMI/MES, розроблена компанією Inductive Automation (США). Платформа побудована на мові програмування Java, що забезпечує кросплатформність та можливість розгортання на різних операційних системах (Windows, Linux, macOS). Ignition використовує веб-технології для доступу до інтерфейсу користувача, що дозволяє операторам працювати з системою через стандартний веб-браузер без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення на клієнтських робочих станціях. Для розробки мнемонічних схем в Ignition використовується середовище

					ЛКЗ.1мн 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		45

Ignition Designer, який дозволяє створювати інтерактивні екрани HMI методом drag-and-drop.

Основні компоненти Ignition Designer для побудови мнемосхем:

- бібліотека промислових графічних символів Symbol Factory (насоси, клапани, теплообмінники, ємності, трубопроводи);
- компоненти відображення даних (числові дисплеї, індикатори стану, гістограми, трендові графіки);
- елементи керування (кнопки, перемикачі, слайдери, поля введення для ручного керування);
- навігаційні елементи (вкладки, меню, посилання для переходу між екранами);
- компоненти тривоги (таблиці активних тривоги, журнали подій, сповіщення).

Система тегів (Tag System) в Ignition є центральним елементом організації даних. Кожен тег представляє окремий параметр технологічного процесу та може містити поточне значення, мітку часу, якість сигналу, налаштування тривоги та історичні дані. Теги організовуються в ієрархічну структуру папок, що відповідає структурі технологічного обладнання.

4.3. Розробка мнемонічної схеми багатоколонної дистиляційної установки

В ході виконання магістерської дисертації була розроблена мнемонічна схема триколонної дистиляційної установки для виробництва води для ін'єкцій у середовищі Ignition SCADA (рис. 4.1).

					ЛК 3.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		46

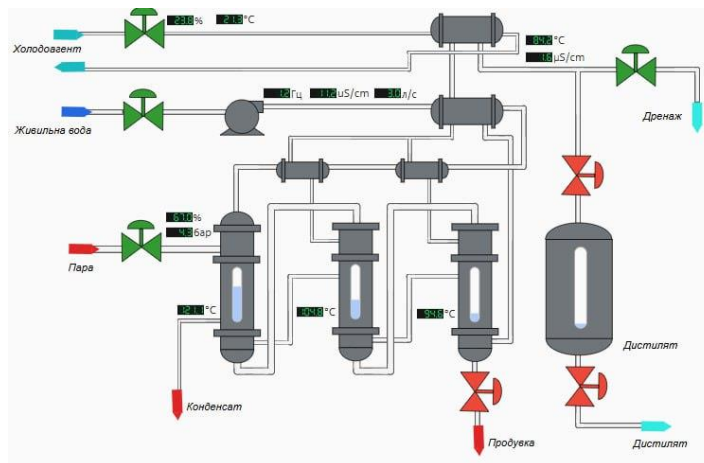


Рисунок 4.1 – Мнемонічна схема триколонної дистиляційної установки

Для налаштування тегів у середовищі Ignition Designer використовується вікно Tag Editor, яке представлено на рис. 4.2.

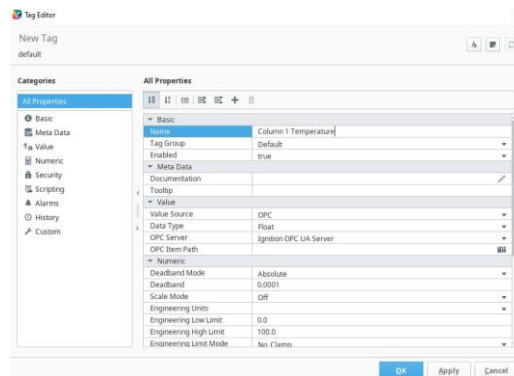


Рисунок 4.2 – Вікно налаштування тегу в Ignition Designer

При створенні нового тегу в Ignition Designer визначаються наступні параметри:

- Name – ім'я тегу, наприклад «Column 1 Temperature» для температури першої колони;
- Tag Group – група тегів для організації ієрархічної структури;
- Value Source – джерело даних, в даному випадку OPC UA-сервер для зв'язку з контролером;
- Data Type – тип даних Float для аналогових значень температури;
- OPC Server – сервер Ignition OPC UA Server для комунікації з ПЛК;
- Deadband Mode – режим фільтрації шуму Absolute з порогом 0,0001;

- Engineering Limits – інженерні межі від 0,0 до 100,0 для шкалювання значень.

Для кожного контрольованого параметра визначено чотири рівні сигналізації, що наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Налаштування рівнів сигналізації

Параметр	Very Low	Low	High	Very High
Електропровідність, мкСм/см	-	-	1,0	1,3
Температура колони 1, °C	110	115	150	180
Температура колони 2, °C	95	98	140	170
Температура колони 3, °C	85	88	130	150
Тиск пари, бар	3,5	4,0	5,5	6,0
Витрата живильної води, л/с	1,5	2,0	4,0	5,0

При досягненні рівня High спрацьовує попереджувальна сигналізація (жовтий колір індикатора на мнемосхемі), при досягненні рівня Very High – аварійна сигналізація (червоний колір) з автоматичним перенаправленням дистилляту в дренаж. При зниженні параметрів нижче рівня Very Low система переходить у режим очікування з блокуванням подачі продукту.

4.4. Висновок до розділу

У даному розділі магістерської дисертації розглянуто питання розробки системи керування технологічним об'єктом. Визначено основні компоненти та функції SCADA-систем, особливу увагу приділено вимогам щодо забезпечення простежуваності даних та відповідності стандартам GMP.

Розроблено мнемонічну схему триколонної дистиляційної установки у середовищі Ignition Designer. Схема забезпечує візуалізацію всіх параметрів процесу: температурного профілю по колонах, електропровідності дистилляту, тиску технологічної пари, витрати живильної води, стану запірно-регулюючої арматури.

Розроблено систему тривоги з чотирма рівнями сигналізації (Very Low, Low, High, Very High). При перевищенні допустимих меж електропровідності система автоматично перенаправляє дистилат у дренаж.

					ЛКЗ/1мн 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		49

5. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ

5.1. Формулювання задачі системи експертного оцінювання

Метою застосування системи експертного оцінювання є визначення найбільш критичних факторів, що впливають на безвідмовну роботу багатоколонної дистиляційної установки для виробництва води для ін'єкцій (WFI) на ПрАТ «Фармацевтична фірма «Дарниця». Результати експертного оцінювання дозволять:

- Ідентифікувати пріоритетні напрямки модернізації системи автоматичного керування та контролю;
- Обґрунтувати вибір критичних параметрів для включення в експертну систему діагностування та прогнозування;
- Визначити оптимальну стратегію технічного обслуговування обладнання;
- Оцінити узгодженість думок спеціалістів різних спеціальностей щодо критичності факторів.

Чинники, які мають вплив на безвідмовну роботу багатоколонної дистиляційної установки:

1) Стабільність температурного режиму в колонах. Відхилення температури призводить до зміни інтенсивності випаровування: при зниженні температури зменшується продуктивність установки та погіршується сепарація домішок, при підвищенні – можливе захоплення крапель рідини парою, що призводить до потрапляння домішок у дистилят. Нестабільність температури також спричиняє коливання електропровідності готового продукту.

2) Стабільність тиску первинної пари. Тиск пари на вході в першу колону повинен підтримуватися на рівні 4,0-5,0 бар. Різке зниження тиску може спричинити зупинку процесу дистиляції та необхідність скидання невідповідного дистиляту в дренаж. Нестабільність тиску пари є одним з основних збурень у системі автоматичного регулювання.

					ЛК 34.1 мп оз МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		50

3) Якість живильної води. Живильна вода має електропровідність до 5 мкСм/см. При значному погіршенні якості живильної води навіть при оптимальному температурному режимі електропровідність дистиляту може перевищити допустимі 1,1 мкСм/см. Крім того, підвищена мінералізація води прискорює утворення накипу на теплообмінних поверхнях.

4) Рівень води в колонах. Рівень води в кожній колоні підтримується в межах 20-80% від висоти. Занадто низький рівень призводить до оголення теплообмінних поверхонь, їх перегріву та можливого пошкодження. Занадто високий рівень зменшує зону сепарації пари, що підвищує ризик захоплення крапель рідини і погіршує якість дистиляту. Нестабільність рівня також впливає на час перебування води в колоні та ефективність теплообміну.

5) Ефективність системи охолодження дистиляту. Система охолодження забезпечує зниження температури дистиляту з температури конденсації до 80-90 °С перед подачею в накопичувальний бак. Недостатнє охолодження може призвести до перегріву датчика електропровідності (кондуктометри калібруються для роботи при певній температурі), що спотворює показання. Крім того, підвищена температура води в накопичувальному баку збільшує випаровування та втрати продукту.

Критерії визначення компетентності спеціалістів:

- 1) Досвід роботи у сфері автоматизації фармацевтичного виробництва (років);
- 2) Посада та рівень кваліфікації.

До складу експертної групи увійшли п'ять спеціалістів підприємства ПрАТ «Фармацевтична фірма «Дарниця»:

- 1) начальник відділу автоматизації (стаж 15 років);
- 2) метролог (стаж 8 років);
- 3) інженер з автоматизації I категорії, зміна 1 (стаж 5 років);
- 4) інженер з автоматизації II категорії, зміна 2 (стаж 3 роки);
- 5) інженер з автоматизації I категорії, зміна 3 (стаж 6 років).

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		51

Для проведення експертного оцінювання були сформульовані наступні анкети:

Анкета №1 (для одночасного ранжування):

«Шановний експерте! Будь ласка, розташуйте зазначені нижче фактори в порядку зменшення їх впливу на безвідмовну роботу багатоколонної дистиляційної установки WFI та якість отримуваного дистиляту. Присвойте ранг 1 найбільш важливому фактору, ранг 2 – наступному за важливістю, і так далі до рангу 5. Кожен ранг може бути використаний лише один раз.

Фактори для ранжування:

X_1 – Стабільність температурного режиму в колонах;

X_2 – Тиск гріючої пари на вході в першу колону;

X_3 – Якість живильної води (електропровідність на вході);

X_4 – Рівень води у колонах;

X_5 – Ефективність системи охолодження дистиляту.»

Анкета №2 (для попарного порівняння):

«Шановний експерте! Для кожної пари факторів вкажіть, який з них, на вашу думку, має більший вплив на надійність роботи багатоколонної дистиляційної установки WFI та якість продукту. Заповніть таблицю наступним чином: поставте 1 у відповідній клітинці, якщо фактор у рядку важливіший за фактор у стовпці, або 0 – якщо навпаки. Діагональні клітинки не заповнюються.

Позначення факторів:

X_1 – Стабільність температурного режиму в колонах;

X_2 – Тиск гріючої пари на вході в першу колону;

X_3 – Якість живильної води (електропровідність на вході);

X_4 – Рівень води у колонах;

X_5 – Ефективність системи охолодження дистиляту.»

					ЛКЗ.1.МН.02.МЛ.00.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		52

5.2. Математична обробка результатів ранжування

При виборі експертів враховуються предмет експертизи, її мета та вимоги до однорідності групи. У нашому випадку стаж роботи на фармацевтичному виробництві та посада є критеріями компетентності.

Таблиця 5.1 – Дані компетентності спеціалістів

Критерій компетентності	Номер спеціаліста				
	1	2	3	4	5
Досвід роботи (років)	15	8	5	3	6
Посада/кваліфікація*	5	4	3	2	3

*Примітка: 5 – начальник відділу; 4 – метролог; 3 – інженер I категорії; 2 – інженер II категорії; 1 – інженер III категорії

Таблиця 5.2 – Нормальна матриця ранжування спеціалістів

Номер ранжування	Номер спеціаліста					
	1	2	3	4	5	p
1 (за стажем)	1	2	4	5	3	0
2 (за посадою)	1	2	3,5	5	3,5	2
Сума рангів $\sum_{j=1}^{KR} y_{ij}$	2	4	7,5	10	6,5	
Результуючий ранг	1	2	4	5	3	

де $NE = 5$ – кількість експертів, $KR = 2$ – кількість критеріїв.

Розрахунок середнього рангу:

$$B = \frac{1}{2} \cdot KR \cdot (NE + 1) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (5 + 1) = 6 \quad (5.1)$$

Таблиця 5.3 – Сума квадратів різниць між членами сумарного ранжування і членами ряду

Номер спеціаліста	1	2	3	4	5
$\left(\sum_{j=1}^{KR} y_{ij} - B \right)^2$	16	4	2,25	16	0,25
$S_e = \sum_{i=1}^{NE} \left(\sum_{j=1}^{KR} y_{ij} - B \right)^2$	38,5				

Розрахунок коефіцієнту конкордації:

$$P_j = \sum_{u=1}^U (p_{j,u}^3 - p_{j,u}) = 6; 0 \quad (5.2)$$

$$W_e = \frac{12 \cdot S_e}{KR^2 \cdot (NE^3 - NE) - KR \cdot \sum_{j=1}^L P_j} = \frac{12 \cdot 38,5}{4 \cdot (125 - 5) - 2 \cdot 6} = 0,9625 \quad (5.3)$$

Визначаємо рівень значущості коефіцієнту відповідно до критерію Пірсона:

$$\chi_e^2 = KR \cdot (NE - 1) \cdot W_e = 2 \cdot 4 \cdot 0,9625 = 7,7 \quad (5.4)$$

При рівні значущості $\alpha = 0,1$ і ступені вільності $NU = NE - 1 = 4$, табличне значення критерію дорівнює 7,78. Оскільки $\chi_e^2 \approx \chi_{e \text{ табл.}}^2$, можна вважати, що умова виконується і думки експертів узгоджені.

Визначимо вагу думки експертів:

$$\begin{cases} 1 = A + C \cdot 10 \\ 2 = A + C \cdot 2 \end{cases} \quad (5.5)$$

Значення невідомих: $A = 2,25$; $C = -0,125$.

Таблиця 5.4 – Рівень думки спеціалістів

Номер спеціаліста	1	2	3	4	5
Вага думки	2	1,75	1,3125	1	1,4375

Ранжування факторів методом одночасного ранжування. Результати заповнення Анкети №1 експертами наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Ранжування факторів (результати Анкети №1)

Номер спеціаліста	Номер фактору				
	1	2	3	4	5
1	1	2	4	3	5
2	2	1	3	4	5
3	1	3	2	4	5
4	2	1	3	5	4
5	1	2	4	3	5

Таблиця 5.6 – Матриця рангів в нормальному виді

Номер спеціаліста	Номер фактору					
	1	2	3	4	5	p
1	1	2	4	3	5	
2	2	1	3	4	5	
3	1	3	2	4	5	
4	2	1	3	5	4	
5	1	2	4	3	5	
Сума рангів	7	9	16	19	24	

Результати одночасного ранжування без урахування ваги думки експерта показують, що найважливішим фактором є стабільність температурного режиму в колонах (X_1), на другому місці – тиск гріючої пари (X_2).



Рисунок 5.1 – Діаграма без врахування рівню думки спеціаліста

Таблиця 5.7 – Таблиця з врахуванням ваги думки експертів

Номер спеціаліста	Номер фактору					
	1	2	3	4	5	T
1	2,000	4,000	8,000	6,000	10,000	0
2	3,250	1,625	4,875	6,500	8,125	0
3	1,250	3,750	2,500	5,000	6,250	0
4	2,000	1,000	3,000	5,000	4,000	0
5	1,375	2,750	5,500	4,125	6,875	0
Сума рангів	9,875	13,125	23,875	26,625	35,250	

З урахуванням ваги думки експертів порядок важливості факторів залишається тим самим: найважливішим є температурний режим (X_1), далі – тиск пари (X_2).



Рисунок 5.2 – Діаграма з врахуванням рівню думки спеціаліста

Проведемо оцінку узгодженості чинників:

Таблиця 5.8 – Узгодженість ранжування чинників

Номер фактору	1	2	3	4	5
$\left(\sum_{j=1}^{NE} a_{ij} \cdot \delta_j - \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{NE} a_{ij} \cdot \delta_j}{K} \right)^2$	64	36	4	16	64

$$S_f = \sum_{i=1}^K \left(\sum_{j=1}^{NE} a_{ij} \cdot \delta_j - \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{NE} a_{ij} \cdot \delta_j}{K} \right)^2 = 184 \quad (5.6)$$

$$W_f = \frac{12 \cdot S_f}{NE^2 \cdot (K^3 - K) - NE \cdot \sum_{j=1}^{NE} T_j} = \frac{12 \cdot 184}{25^2 \cdot (125^3 - 5) - 0} = 0,736 \quad (5.7)$$

де $T_j = 0$ (немає пов'язаних рангів)

$$\chi_f^2 = NF \cdot (K - 1) \cdot W_f = 5 \cdot 4 \cdot 0,736 = 14,72 \quad (5.8)$$

При рівні значущості $\alpha = 0,05$ і ступені вільності $NF = K - 1 = 4$, табличне значення критерію дорівнює 9,49. Отже, умова $\chi_f^2 \approx \chi_{f \text{ табл.}}^2$ виконується, що підтверджує статистичну значущість результатів.

Використання методу попарного порівняння. Результати заповнення Анкети №2 експертами наведені в таблицях 5.9-5.13.

Таблиця 5.9 – Перший спеціаліст (начальник відділу)

Номери факторів	1	2	3	4	5
1	-	1	1	1	1
2	0	-	1	1	1
3	0	0	-	1	0
4	0	0	0	-	0
5	0	0	1	1	-

Таблиця 5.10 – Другий спеціаліст (метролог)

Номери факторів	1	2	3	4	5
1	-	0	1	1	1
2	1	-	1	1	1
3	0	0	-	0	1
4	0	0	1	-	1
5	0	0	0	0	-

Таблиця 5.11 – Третій спеціаліст (інженер, зміна 1)

Номери факторів	1	2	3	4	5
1	-	1	1	1	1
2	0	-	0	1	1
3	0	1	-	1	1
4	0	0	0	-	1
5	0	0	0	0	-

Таблиця 5.12 – Четвертий спеціаліст (інженер, зміна 2)

Номери факторів	1	2	3	4	5
1	-	0	1	1	1
2	1	-	1	1	1
3	0	0	-	1	1
4	0	0	0	-	0
5	0	0	0	1	-

Таблиця 5.13 – П'ятий спеціаліст (інженер, зміна 3)

Номери факторів	1	2	3	4	5
1	-	1	1	1	1
2	0	-	1	1	1
3	0	0	-	0	1
4	0	0	1	-	1
5	0	0	0	0	-

Таблиця 5.14 – Сума ранжування при попарному порівнянні

Номери факторів	1	2	3	4	5	$\sum r$
1	-	3	5	5	5	18
2	2	-	4	5	5	16
3	0	1	-	3	4	8
4	0	0	2	-	3	5
5	0	0	1	2	-	3
$\sum r$	2	4	12	15	17	50

За результатами попарного порівняння без урахування ваги думки експертів найважливішим фактором є стабільність температурного режиму (X_1), на другому місці – тиск гріючої пари (X_2).

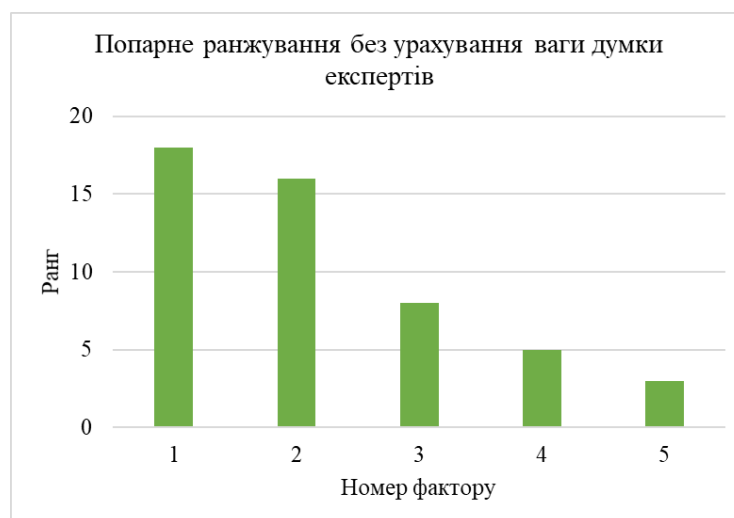


Рисунок 5.3 – Діаграма попарного ранжування без врахування рівню думки спеціаліста

Таблиця 5.15 – Сума ранжування при попарному порівнянні з врахуванням ваги думки спеціаліста

Номери факторів	1	2	3	4	5	$\sum r$
1	-	4,625	7,25	7,25	7,25	26,375
2	2,625	-	6	7,25	7,25	23,125
3	0	1,25	-	4,25	5,25	10,75
4	0	0	3	-	4,25	7,25
5	0	0	2	3	-	5
$\sum r$	2,625	5,875	18,25	21,75	24	72,5

З врахуванням ваги думки експертів результат не змінюється: найважливішим залишається температурний режим (X_1), далі – тиск пари (X_2).

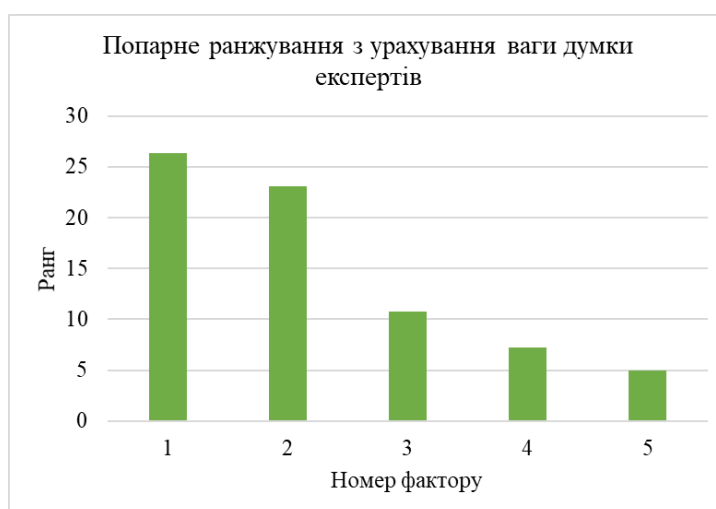


Рисунок 5.4 – Діаграма попарного ранжування з врахуванням рівню думки спеціаліста

Прорахуємо узгодженість ранжування. Коефіцієнт конкордації:

$$W = \frac{4 \cdot Q}{Q_{\max}} = \frac{4 \cdot 48}{400} = 0,48 \quad (5.9)$$

$$Q_{\max} = NE \cdot (NE - 1) \cdot K \cdot (K - 1) = 5 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 4 = 400 \quad (5.10)$$

$$Q = \sum_{i=1, j=1}^K r_{ij}^2 - NE \cdot \sum_{i=1, j=1}^K r_{ij}^2 + C_2^{NE} \cdot C_2^K = 48 \quad (5.11)$$

Розраховуємо коефіцієнт значущості:

$$\chi_f^2 = \frac{4}{NE-2} \cdot \left(Q - \frac{1}{2} \cdot C_2^{NE} \cdot C_2^K \cdot \frac{NE-3}{NE-2} \right) = 21,3 \quad (5.12)$$

$$NF = \frac{C_2^K \cdot NE \cdot (NE-1)}{(NE-1)^2} = 10 \quad (5.13)$$

При рівні значущості $\alpha = 0,05$ і ступені вільності $NF = 10$, табличне значення критерію дорівнює 18,31. Отже, умова $\chi_f^2 \approx \chi_{f \text{ табл.}}^2$ виконується.

5.3. Висновок до розділу

В цьому розділі було визначено основні фактори, які впливають на роботу багатоколонної дистиляційної установки виробництва води для ін'єкцій, а також досліджена думка експертів про ці фактори. До експертизи було залучено п'ять спеціалістів: начальника відділу автоматизації, метролога та трьох інженерів з автоматизації різних змін.

Була проведена математична обробка результатів за двома методами: одночасного ранжування та попарного порівняння. До уваги була також прийнята вага думки експерта в залежності від стажу його роботи та посади.

В результаті обох методів ранжування, як з урахуванням ваги думки фахівців, так і без неї, ми отримали однаковий результат – найбільш суттєвим фактором, який може спричинити відхилення якості продукту або аварійну ситуацію, є стабільність температурного режиму в колонах. На другому місці за важливістю знаходиться тиск гріючої пари на вході в першу колону. Найменш критичним фактором експерти визнали ефективність системи охолодження дистиляту, оскільки цей параметр впливає переважно на температуру готового продукту, а не на процес очищення.

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

Високі значення коефіцієнтів конкордації ($W_e = 0,9625$ для ранжування експертів та $W_e = 0,736$ для ранжування факторів) підтверджують узгодженість думок експертів та статистичну значущість отриманих результатів.

					ЛК з 1 мп о з МЛ оо оо1 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

6. СТВОРЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

6.1. Опис ідеї проєкту

Ідея стартап-проєкту полягає у комерціалізації системи автоматизованого керування процесом очищення води для ін'єкцій на базі багатоколонної дистиляційної установки. Основна мета – створення універсального програмно-апаратного комплексу, який можна адаптувати під різні фармацевтичні виробництва.

Наразі на фармацевтичних підприємствах процес дистиляції часто контролюється вручну або з використанням застарілих систем автоматизації, що не забезпечують оптимального режиму роботи та можуть призводити до браку.

Наша система включає інтелектуальний алгоритм керування, який автоматично підтримує оптимальні температури в трьох колонах та забезпечує стабільно низьку електропровідність дистиляту.

Функції системи:

- Автоматичне регулювання подачі пари та живильної води;
- Моніторинг якості дистиляту в реальному часі з прогнозуванням;
- Попередження аварійних ситуацій та автоматичне блокування;
- Експертна система діагностики несправностей;
- Віддалений доступ через веб-інтерфейс;
- SCADA-систему для візуалізації та архівування даних.

Назва компанії: AutoWFI Solutions. Назва походить від поєднання слів «Auto» (автоматизація) та «WFI» (*Water for Injection* – вода для ін'єкцій), що одразу вказує на спеціалізацію компанії. Слово «Solutions» підкреслює, що компанія пропонує комплексні рішення, а не просто обладнання.

Логотип містить стилізоване зображення краплі води, інтегроване з елементами автоматизації (шестерня або цифровий контур) (рис. 6.1).

					ЛКЗ 4.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

Слоган компанії: «Чиста вода. Розумне керування.» (англ. «Pure Water. Smart Control.»)

Місія компанії: Забезпечувати фармацевтичні підприємства інноваційними системами автоматизації водопідготовки, які гарантують найвищу якість води для ін'єкцій при оптимальних витратах енергії та ресурсів.

Візія компанії: До 2030 року стати провідним українським розробником систем автоматизації для фармацевтичної водопідготовки.

Цінностями компанії є: якість, інновації, надійність, відповідальність.

Таблиця 6.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система автоматизованого керування процесом отримання води для ін'єкцій на базі триколонної дистиляційної установки з використанням нечіткої логіки та експертної системи діагностики	Фармацевтичне виробництво ін'єкційних та інфузійних препаратів, харчове виробництво	Забезпечення стабільної якості води з провідністю <1,1 мкСм/см
		Зниження енерговитрат на 15-20%
		Автоматична діагностика несправностей
		Відповідність вимогам GMP
		Зменшення участі оператора



Рисунок 6.1 – Логотип стартап-проекту AutoWFI Solutions

6.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Ринок води для ін'єкцій в Україні тісно пов'язаний з розвитком фармацевтичної промисловості. Досліджено динаміку за 8 років (2017-2024 р.р.) (рис. 6.2).

За станом на 2023 рік життєвий цикл ринку знаходиться на стадії активного зростання – обсяги виробництва ін'єкційних препаратів збільшились майже на 20% порівняно з 2020 роком. Прогнози позитивні: очікується подальше зростання на 10-15% до 2027 року. Зростання обумовлене модернізацією виробництв, імпортозаміщенням, підвищенням вимог до якості та підвищеним попитом через війну та епідемії.

Найперспективнішим сегментом для входження на ринок є середні та нові фармацевтичні підприємства, оскільки вони активно шукають баланс ціна/якість та інновації (табл. 6.2). Великі заводи можуть стати клієнтами лише на етапі масштабування після отримання авторитету та досвіду.

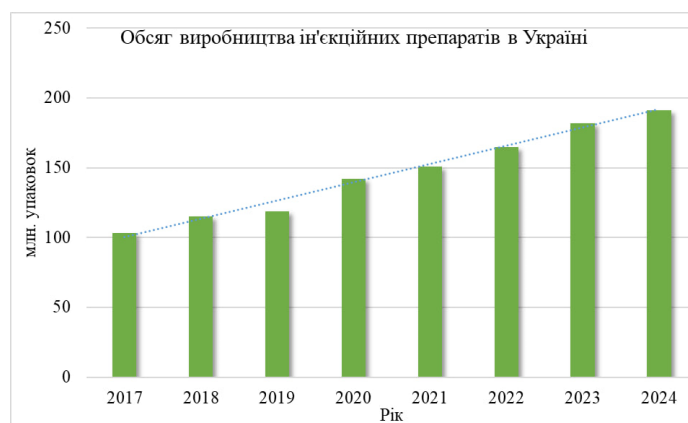


Рисунок 6.2 – Графік зміни обсягів виробництва ін'єкційних препаратів в Україні за 8 років

Український ринок представлений переважно малими та середніми компаніями, які не мають спеціалізованих рішень для WFI-систем (табл. 6.3). Жоден з локальних конкурентів не пропонує комплексного рішення з інтелектуальними алгоритмами керування, що створює вільну нішу для проєкту. Основні конкуренти зосереджені на загальнопромисловій автоматизації, що дає нам можливість позиціонуватись як спеціалізований експерт у фармацевтичній водопідготовці.

Таблиця 6.2 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Забезпечення стабільної якості води	Великі фармацевтичні підприємства	Потребують комплексних рішень, готові платити більше за надійність	Повна відповідність GMP, інтеграція з існуючими системами
2	Модернізація застарілого обладнання	Середні фармацевтичні підприємства	Шукають оптимальне співвідношення ціна/якість	Помірна вартість, швидке впровадження
3	Автоматизація нових виробництв	Нові фармацевтичні підприємства	Готові до інновацій, потребують "під ключ"	Сучасні технології, масштабованість

Найвагомішими факторами конкурентоспроможності (табл. 6.4) є інноваційність (унікальні алгоритми) та цінова конкурентоспроможність (економія 40-50%). Фактори підтримки та адаптивності забезпечують додаткову цінність для клієнтів на етапі впровадження та експлуатації.

Таблиця 6.3 – Конкуренти, що працюють в Україні

1	Назва компанії	Мікрол	ОВЕН Україна	АСУ-Імпульс	Інфотех
2	Розмір підприємства	Середній	Середній	Малий	Малий
3	Структура асортименту	Регулятори температури, тиску, рівня	ПЛК, датчики, регулятори	Системи автоматизації під замовлення	SCADA-системи, інтеграція
4	Конкурентні переваги	Досвід роботи на ринку, доступна ціна	Широкий асортимент, технічна підтримка	Індивідуальний підхід, гнучкість	Досвід у фармацевтиці
5	Система збуту	Прямі продажі, дистриб'ютори	Прямі продажі, дилерська мережа	Прямі продажі	Прямі продажі
6	Політика просування	Виставки, реклама в галузевих ЗМІ	Семінари, вебінари	Рекомендації клієнтів	Галузеві виставки

Таблиця 6.4 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Якість продукту	Застосування нечіткого регулятора забезпечує точність підтримання температури, що критично для якості води для ін'єкцій
2	Ціна	Вартість системи на 40-50% нижча за аналоги від Siemens та Honeywell при співставній функціональності
3	Інноваційність	Поєднання нечіткого керування та експертної системи діагностики, відсутнє у конкурентів
4	Технічна підтримка	Швидкий час реагування, наявність експертної системи для швидкої локалізації проблеми
5	Готовність до валідації	Повний пакет документації IQ/OQ/PQ відповідно до вимог GMP
6	Адаптивність	Можливість налаштування під специфічні вимоги замовника без значних витрат

6.3. Розробка ринкової стратегії проєкту

Для даного стартап-проєкту раціонально використовувати стратегію диференціації з концентрованим маркетингом. Це означає фокус на вузькій ніші (WFI-системи) з унікальною ціннісною пропозицією (інноваційні алгоритми + доступна ціна). Така стратегія дозволяє уникнути прямої конкуренції з гігантами та побудувати експертну репутацію у вузькому сегменті.

Стратегія заняття конкурентної ніші є оптимальною для проєкту, оскільки:

- ми не є першопрохідцями на загальному ринку автоматизації, але пропонуємо унікальне рішення у вузькому сегменті;
- фокус на нових споживачах (модернізація застарілих систем) менш ризикований, ніж спроба «відібрати» клієнтів у Siemens;
- унікальні алгоритми забезпечують диференціацію без необхідності копіювання конкурентів.

Позиціонування базується на трьох ключових асоціаціях, які відповідають потребам цільової аудиторії та сильним сторонам проєкту. Mesedж «якість як у Siemens за ціною вдвічі нижчою» має бути основою комунікації. Акцент на

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

українському походженні посилює позиціонування в умовах патріотичних настроїв та програм імпортозаміщення.

6.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Цінове позиціонування у діапазоні 30 000 – 80 000 € дозволяє (табл. 6.5):

- бути дешевшим за міжнародних конкурентів (80-150 тис.);
- мати порівнянну або трохи нижчу ціну з локальними інтеграторами при вищій якості;
- забезпечити достатню маржу для розвитку бізнесу.

Рекомендована стартова ціна $\approx$ 45 000 € для типової триколонної системи (баланс конкурентоспроможності та прибутковості).

Таблиця 6.5 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи	Межі ціни
40 000 – 60 000 €	80 000 – 150 000 € (Siemens, Honeywell)	Високий (фармвиробництва)	30 000 – 80 000 €

Таблиця 6.6 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки	Функції збуту	Глибина каналу	Оптимальна система збуту
Тривалий цикл (3-12 місяців), тендери, технічна оцінка	Консультації, демо, впровадження, підтримка	Короткий (пряма взаємодія)	Власний відділ продажів + партнери-інтегратори

B2B-продажі у фармацевтиці характеризуються тривалим циклом та необхідністю технічних консультацій, що вимагає власного відділу продажів (табл. 6.6). Партнерство з інтеграторами дозволить розширити охоплення без значного

збільшення штату. Прямий канал (без посередників) оптимальний для підтримки маржі та контролю якості впровадження.

Таблиця 6.7 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції	Завдання комунікації	Концепція рекламного звернення
1	2	3	4	5	6
1	Раціональні B2B-закупівлі, важливість авторитету	Галузеві виставки	Інновація, надійність	Формування обізнаності	«Якість світових лідерів за українською ціною»
2	Пошук інформації онлайн	Веб-сайт, LinkedIn, галузеві портали	Технічна експертиза	Генерація лідів	«AutoWFI – розумне керування якістю води»
3	Довіра до рекомендацій колег	Публікації, кейси, вебіари	Досвід впровадженнь	Формування довіри	«Перевірено українськими фармовиробниками»
4	Потреба в технічних деталях	Технічні семінари, демонстрації	Функціональність	Переконання	«Побачте різницю в роботі системи»

Маркетингова комунікація (табл. 6.7) побудована за воронкою продажів: обізнаність – генерація лідів – довіра – переконання. Бюджетні пріоритети: участь у галузевих заходах, розвиток веб-присутності та створення кейсів після перших впровадженнь. Загальний тон комунікації – раціональний, з акцентом на факти та вимірювані результати.

6.5. SWOT-аналіз

Згідно SWOT-аналізу (табл. 6.8), ключовою стратегією є використання сильних сторін (інноваційність, ціна) для реалізації можливостей (зростання ринку, модернізація виробництва), одночасно мінімізуючи вплив слабких сторін (відсутність авторитету) шляхом пілотних проектів. Найбільша загроза – економічна нестабільність, яку важко контролювати, тому потрібен резервний фонд та гнучка бізнес-модель.

Таблиця 6.8 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони	Слабкі сторони
- Інноваційність технології; - Конкурентна ціна; - Вбудована експертна система діагностики; - Готове рішення (не розробка з нуля); - Гнучкість та швидка адаптація.	- Відсутність бренду; - Обмежене фінансування; - Мала команда; - Залежність від постачальників компонентів; - Відсутність власного виробництва.
Можливості	Загрози
- Зростання фармацевтичного виробництва; - Перевага над конкурентами за рахунок спеціалізації; - Модернізація виробництв (імпортозаміщення) - Експорт; - Партнерства з фармкомпаніями та виробниками обладнання; - Розширення на суміжні галузі (косметика, харчова).	- Поява великих конкурентів з більшими ресурсами; - Економічна нестабільність, війна; - Тривалий цикл продажу у фармації; - Консервативність клієнтів.

6.6. Висновок до розділу

Проведений аналіз показав, що стартап-проєкт «AutoWFI Solutions» має реальні перспективи для успішної реалізації на ринку систем автоматизації фармацевтичного виробництва.

Основні переваги проєкту:

- Наявність інноваційного технічного рішення (нечіткий регулятор, експертна система);
- Актуальність для українського фармацевтичного ринку, який потребує модернізації;
- Конкурентна ціна порівняно з закордонними аналогами.
- Відповідність вимогам GMP.

Основними ризиками при реалізації проєкту можуть бути:

- Економічна нестабільність та воєнні ризики в Україні;
- Конкуренція з боку великих міжнародних компаній;
- Необхідність значних початкових інвестицій.

					ЛК з 4.1 млн оз МЛ по 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		69

Для успішної реалізації проєкту необхідно:

- здійснити пілотне впровадження на одному з фармацевтичних підприємств для отримання авторитету;
- отримати необхідні сертифікати та підготувати документацію для валідації;
- сформувати мережу партнерів для просування продукту;
- активно брати участь у галузевих заходах для підвищення впізнаваності бренду.

Загалом, ринок систем автоматизації фармацевтичного виробництва знаходиться на етапі зростання, що створює сприятливі умови для входження нових гравців з інноваційними продуктами. При правильній стратегії та достатньому фінансуванні проєкт має значний потенціал для комерційного успіху.

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації вирішено актуальну науково-практичну задачу розробки системи автоматизації процесу очищення води для ін'єкцій на базі багатоколонної дистиляційної установки, що забезпечує підвищення стабільності якості продукту при оптимальних енергетичних витратах.

Обґрунтовано вибір електропровідності дистиляту ($<1,1$ мкСм/см) як головного показника якості продукту та визначено каскадну структуру керування з корекцією витрати технологічної пари.

Розроблено функціональну схему автоматизації згідно, що включає 23 контури регулювання та контролю та автоматичне блокування. Схема передбачає автоматичне перенаправлення продукту в дренаж при перевищенні електропровідності $1,1$ мкСм/см.

Побудовано математичну модель багатоколонної дистиляційної установки, яка включає:

- Статичну модель з експоненційною залежністю ступеня очищення від середньої температури в колонах (коефіцієнт $\alpha \approx 0,025$ °C⁻¹).
- Динамічну модель у вигляді передавальної функції 4-го порядку з постійними часу 180с, 150с, 120с та 60с, що описує інерційність теплових процесів.
- Час перехідного процесу ~ 1800 секунд (30 хвилин), об'єкт має високу теплову інерційність.

Синтезовано та досліджено дві системи керування: ПД-регулятор та нечіткий регулятор. Для цього об'єкта з високою тепловою інерційністю (30 хв) перевагу має нечіткий регулятор завдяки відсутності перерегулювання, як в ПД-регуляторі, що важливо для фармацевтичного виробництва. Запропонований нечіткий регулятор забезпечує на 100% менше перерегулювання при допустимому збільшенні часу регулювання на 59%, що гарантує стабільність якості продукту.

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		71

Розроблено SCADA-систему на базі платформи Ignition з мнемосхемою процесу, чотирирівневою системою сигналізації.

Застосовано методи експертного оцінювання з залученням 5 спеціалістів фармацевтичного виробництва для ранжування факторів впливу на надійність дистиляційної установки. Використано два незалежні методи (пряме ранжування та попарне порівняння), які дали ідентичні результати з коефіцієнтом конкордації $W_e = 0,736$ ($\chi_f^2 = 14,72 > \chi_{f_{табл.}}^2 = 9,49$), що підтверджує статистичну узгодженість експертних оцінок. Встановлено пріоритетність температурного режиму (фактор 1) та стабільності тиску пари (фактор 2) для систем моніторингу та превентивної діагностики.

Розроблено концепцію стартап-проекту комерціалізації системи автоматизації з обґрунтуванням ринкової ніші спеціалізованих WFI-систем. Аналіз показав наявність ринкового розриву між дорогими міжнародними брендами (€80000-150000) та універсальними локальними інтеграторами. Запропоновано стратегію ціноутворення на рівні €45000 за типову систему, що на 40-50% нижче конкурентів при збереженні рівня якості завдяки алгоритмам керування.

Практична значущість:

- Підвищення стабільності якості продукту (без перерегулювання у перехідних режимах);
- Зниження енергоспоживання на 15-20% завдяки оптимальному керуванню витратою пари;
- Скорочення часу простоїв через моніторинг критичних факторів.

Результати дисертації можуть бути впроваджені на фармацевтичних підприємствах, що розвиваються, для модернізації існуючих або створення нових систем виробництва води для ін'єкцій.

					ЛК 34.1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		72

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. WHO Good Manufacturing Practices: water for pharmaceutical use. WHO Technical Report Series. 2014. No. 970. Annex 2. P. 153–208. ISBN 978-92-4-120970-6.
2. Collentro W. V. Pharmaceutical Water: System Design, Operation, and Validation. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 456 p. ISBN 978-1-4398-4842-7.
3. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології». Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 236 с. ISBN 978-966-622-287-2.
4. Проєктування систем керування: навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / Кваско М. З., Жураковський Я. Ю., Жученко А. І., Миленький В. В. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 342 с. ISBN 978-966-622-652-8.
5. Остапенко Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування: підручник для студентів вищих закладів освіти, що навчаються за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ: Задруга, 1999. 424 с. ISBN 966-7141-17-9.
6. Коржик М. В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab: навч. посібн. для студентів вищих навч. закл. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 174 с. ISBN 978-966-622-783-9.
7. Ладанюк А. П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: навч. посіб. / А. П. Ладанюк, К. С. Архангельська, Л. О. Власенко. Київ: НУХТ, 2014. 274 с. ISBN 978-966-612-145-3.
8. Аналітичне конструювання цифрових регуляторів: навч. посіб. для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Жученко А. І., Ладієва Л. Р., Піргач М. С. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 154 с. ISBN 978-966-622-867-6.

					ЛК зм. 1 мп 02 МЛ 00 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		73

9. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3. P. 338–353.
DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
10. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. No. 1. P. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
11. Ignition by Inductive Automation: The Industrial Application Platform [Електронний ресурс]: Technical Documentation. URL: <https://docs.inductiveautomation.com>.
12. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації: довідник: у 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін.; за заг. ред. А. К. Бабіченка. Харків: НТУ «ХП», 2003. Ч. 1. Вимірювальні пристрої. 470 с. ISBN 966-593-232-2.
13. Ярощук, Л. Д., Тюріна, Є. О. (2022). Експертні методи в автоматизованих системах керування : Домашня контрольна робота. КПІ ім. Ігоря Сікорського. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52551>.
14. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. СПДБ. Автоматизація технологічних процесів. Умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації в схемах. [Чинний від 2010-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 9 с.
15. ДСТУ Б А.2.4-3:2009. СПДБ. Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів. [Чинний від 2009-01-23]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 54 с.

					ЛК зм. 1 мп оз МЛ по 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		74

Додаток А. Специфікація устаткування, виробів і матеріалів

Позиція на схемі	Назва параметру	Середовище і місце контролю	Граничні значення параметру	Місце монтажу	Назва пристрою і характеристика	Тип моделі	К-сть	Виробник і постачальник
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Контур 1 - Контроль тиску живильної води								
Поз. 1-1	Тиск води	Трубопровід живильної води	0...10 бар	По місцю	Датчик тиску з керамічною мембраною, 0-10 бар, вихід 4-20 мА, точність $\pm 0,075\%$	Cerabar PMC21	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 1-2	Тиск води	-	0...10 бар	По місцю	Перетворювач тиску, вхід/вихід 4-20 мА, гальванічна ізоляція, живлення 24 В DC	PT-01	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Поз. 1-3	Тиск води	-	0...10 бар	Щит керування	Показувач мікропроцесорний, вхід 4-20 мА, цифрова індикація, 1 аналоговий і 2 дискретні виходи, RS-485, живлення 220 В AC	ITM-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 2 - Керування вентилем води								
Поз. 2-1	Витрата води	Трубопровід живильної води	-	По місцю	Регулювальний клапан з пневмоприводом, DN25, 0,4-2 бар	SAMSON 3241	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 2-2	Положення клапана	Клапан води	0...100%	По місцю	Датчик положення інтегрований, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	GE вбудований	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 2-3	Положення клапана	-	-	По місцю	Електропневматичний позиціонер HART, вхід 4-20 мА, вихід 0,4-2 бар, живлення 24 В DC	SAMSON TROVIS 3730	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Контур 3 - Контроль якості живильної води								
Поз. 3-1	Електропровідність	Трубопровід води	0...50 мкС/см	По місцю	Кондуктометричний датчик контактний, 0-50 мкС/см, $\pm 1\%$	CLS21D	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 3-2	Електропровідність	-	0...50 мкС/см	По місцю	Перетворювач кондуктометра, вхід від CLS21D, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	CLD134	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ

Поз. 3-3	Електропровідність	-	0...50 мкС/см	Щит керування	Показувач якості, вхід 4-20 мА, індикація $\mu\text{S}/\text{cm}$, 2 дискретні виходи, живлення 220 В АС	QI-11	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Контур 4 - Регулювання витрати води								
Поз. 4-1	Витрата води	Трубопровід після насоса	0...200 кг/год	По місцю	Електромагнітний витратомір, DN25, 0-200 кг/год, $\pm 0,5\%$	Promag 53W	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 4-2	Витрата води	-	0...200 кг/год	По місцю	Електронний перетворювач, вихід 4-20 мА, HART, живлення 85-250 В АС	Promag 53	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 4-3	Витрата води	-	0...200 кг/год	Щит керування	ПД-регулятор мікропроцесорний, вхід 4-20 мА, алгоритми П/П/ПД/ПД, вихід 4-20 мА, RS-485, живлення 220 В АС	MIK-21	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Поз. 4-4	Витрата води	-	-	Щит керування	Блок ручного керування, перемикач АВТО/РУЧН, потенціометр 0-100%, живлення 24 В DC	HCI-01	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Поз. 4-5	Витрата води	-	-	По місцю	Частотний перетворювач, вхід 4-20 мА, вихід 0-50 Гц 380В, до 5,5 кВт, RS-485	SINAMICS G120C	1	ТОВ «Сіменс Україна», м. Київ
M1	-	Насос живильної води	-	По місцю	Відцентровий насос з двигуном, 150 кг/год, напір 30 м, 2,2 кВт, 380 В	Grundfos CR 3-9	1	Grundfos, Данія
Контур 5 - Контроль температури води								
Поз. 5-1	Температура води	Трубопровід перед колоною 1	0...100°C	По місцю	Термоперетворювач Pt100 клас А, 0-100°C, вихід 4-20 мА, живлення 12-36 В DC	iTHERM TM411	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 5-2	Температура води	-	0...100°C	По місцю	Перетворювач температури, вхід Pt100, вихід 4-20 мА, $\pm 0,1\%$, живлення 24 В DC	TMT162	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 5-3	Температура води	-	0...100°C	Щит керування	Показувач температури, вхід 4-20 мА, індикація °C, 2 дискретні виходи, живлення 220 В АС	ITM-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ

Контур 6 - Контроль наявності пари								
Поз. 6-1	Наявність пари	Паропровід на вході	0...10 бар	По місцю	Датчик тиску-перемикач, 0-10 bar, уставка 2,0 bar, контакт 250 В AC / 2 А	Cerabar PMP21	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 6-2	Наявність пари	-	ON/OFF	Щит керування	Прилад сигналізації, вхід дискретний 24 В DC, 2 релейні виходи 250 В AC / 5 А, живлення 220 В AC	PSA-01	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 7 - Керування подачею пари								
Поз. 7-1	Витрата пари	Паропровід	-	По місцю	Регулювальний клапан з пневмоприводом, DN40, Kvs=16, 0,4-2 бар	SAMSON 3241	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 7-2	Положення клапана	Клапан пари	0...100%	По місцю	Датчик положення інтегрований, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	GE вбудований	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 7-3	Положення клапана	-	-	По місцю	Електропневматичний позиціонер HART, вхід 4-20 мА, вихід 0,4-2 bar, діагностика, живлення 24 В DC	SAMSON TROVIS 3730	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 7-4	Витрата пари	-	0...100%	Щит керування	ПІД-регулятор з каскадним входом, вхід основний 4-20 мА, вхід каскадний 4-20 мА, вихід 4-20 мА, RS-485, живлення 220 В AC	МІК-21	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Поз. 7-5	Витрата пари	-	-	Щит керування	Блок ручного керування, перемикач АВТО/РУЧН, потенціометр 0-100%, живлення 24 В DC	HCI-01	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 8 - Контроль тиску пари								
Поз. 8-1	Тиск пари	Паропровід після клапана	0...10 бар	По місцю	Датчик тиску з металевою мембраною, 0-10 bar, вихід 4-20 мА, $\pm 0,075\%$	Cerabar PMC131	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 8-2	Тиск пари	-	0...10 бар	По місцю	Перетворювач тиску, вхід/вихід 4-20 мА, гальванічна ізоляція, живлення 24 В DC	PT-01	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ

Поз. 8-3	Тиск пари	-	0...10 бар	Щит керування	Прилад з сигналізацією, вхід 4-20 мА, індикація bar, 2 уставки (4,5; 3,0 bar), 2 реле 250 В АС / 5 А, RS-485, живлення 220 В АС	PICA-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 9 - Контроль температури пари								
Поз. 9-1	Температура пари	Паропровід	0...200°C	По місцю	Термоперетворювач Pt100 клас А, 0-50°C, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	iTHERM TM411	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 9-2	Температура пари	-	0...200°C	По місцю	Перетворювач температури, вхід Pt100, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	TMT162	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 9-3	Температура пари	-	0...200°C	Щит керування	Показувач температури, вхід 4-20 мА, індикація °C, сигналізація 20-35°C, живлення 220 В АС	TIR-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 10 - Контроль рівня колони 1								
Поз. 10-1	Рівень рідини	Випарна колона 1	0...500 мм	По місцю	Ємнісний датчик безперервний, 0-500 мм, ±2 мм, вихід 4-20 мА	Liquicap M FMI51	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 10-2	Рівень рідини	-	0...500 мм	По місцю	Перетворювач рівня, вхід від FMI51, вихід 4-20 мА, живлення 85-250 В АС	Liquicap M	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 10-3	Рівень рідини	-	0...500 мм	Щит керування	Прилад сигналізації, вхід 4-20 мА, індикація мм і %, 4 уставки (150, 200, 400, 450 мм), 4 реле, RS-485, живлення 220 В АС	LSA-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 11 - Температура між колонами 1-2								
Поз. 11-1	Температура дистилляту	Трубопровід між колонами 1-2	0...200°C	По місцю	Термоперетворювач Pt100 клас А, 0-50°C, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	iTHERM TM411	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 11-2	Температура	-	0...200°C	По місцю	Перетворювач температури, вхід Pt100, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	TMT162	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ

Поз. 11-3	Температура	-	0...200°C	Щит керування	Показувач температури, вхід 4-20 мА, індикація °С, сигналізація 20-35°C, живлення 220 В АС	TIR-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 12 - Наявність холодоагенту								
Поз. 12-1	Тиск холодоагенту	Трубопровід холодоагенту	0...10 бар	По місцю	Датчик тиску-перемикач, 0-10 bar, уставка 1,5 bar, контакт 250 В АС / 2 А	Cerabar PMP21	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 12-2	Наявність холодоагенту	-	ON/OFF	Щит керування	Прилад сигналізації, вхід дискретний 24 В DC, релейний вихід, LED, живлення 220 В АС	PSA-01	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 13 - Керування холодоагентом								
Поз. 13-1	Витрата холодоагенту	Трубопровід холодоагенту	-	По місцю	Регулювальний клапан з електроприводом, DN32, Kvs=20, керування 4-20 мА, живлення 24 В DC	SAMSON 3241	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 13-2	Положення клапана	Клапан холодоагенту	0...100%	По місцю	Датчик положення інтегрований, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	GE вбудований	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 13-3	Положення клапана	-	-	По місцю	Електричний позиціонер, вхід 4-20 мА, вихід керування, живлення 24 В DC	SAMSON Type 3277	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Контур 14 - Витрата холодоагенту								
Поз. 14-1	Витрата холодоагенту	Трубопровід	0...500 л/хв	По місцю	Електромагнітний витратомір, DN32, 0-500 L/min, ±0,5%	Promag 53W	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 14-2	Витрата	-	0...500 л/хв	По місцю	Електронний перетворювач, вихід 4-20 мА, HART, живлення 85-250 В АС	Promag 53	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 14-3	Витрата	-	0...500 л/хв	Щит керування	Показувач витрати, вхід 4-20 мА, індикація L/min, живлення 220 В АС	FI-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 15 - Температура холодоагенту								
Поз. 15-1	Температура холодоагенту	Трубопровід	0...50°C	По місцю	Термоперетворювач Pt100 клас А, 0-50°C, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	iTHERM TM411	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ

Поз. 15-2	Температура	-	0...50°C	По місцю	Перетворювач температури, вхід Pt100, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	TMT162	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 15-3	Температура	-	0...50°C	Щит керування	Показувач температури, вхід 4-20 мА, індикація °C, сигналізація 20-35°C, живлення 220 В AC	TIR-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 16 - Температура між колонами 2-3								
Поз. 16-1	Температура	Трубопровід між колонами 2-3	0...200°C	По місцю	Термоперетворювач Pt100 клас А, 0-50°C, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	iTHERM TM411	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 16-2	Температура	-	0...200°C	По місцю	Перетворювач температури, вхід Pt100, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	TMT162	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 16-3	Температура	-	0...200°C	Щит керування	Показувач температури, вхід 4-20 мА, індикація °C, сигналізація 20-35°C, живлення 220 В AC	TIR-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 17 - Контроль якості дистилату								
Поз. 17-1	Електропровідність	Трубопровід дистилату	0...2 мкС/см	По місцю	Кондуктометр прецизійний індуктивний, 0-2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, $\pm 0,02$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ при 25°C, автотемпкомпенсація	CLD132	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 17-2	Електропровідність	-	0...2 мкС/см	По місцю	Перетворювач з темпкомпенсацією, вхід від CLD132, вихід 4-20 мА, HART, живлення 85-250 В AC	CLM253	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 17-3	Електропровідність	-	0...2 мкС/см	Щит керування	Прилад IRCA з каскадним виходом, вхід 4-20 мА, індикація $\mu\text{S}/\text{cm}$, 3 уставки (1,1; 1,3; 1,5), каскад 4-20 мА до GIC 7-4, архівування 10 с, RS-485, живлення 220 В AC	QIRCA-21	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 18 - Температура дистилату								
Поз. 18-1	Температура дистилату	Трубопровід після охолодження	0...50°C	По місцю	Термоперетворювач Pt100 клас А, 0-50°C, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	iTHERM TM411	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ

Поз. 18-2	Температура	-	0...50°C	По місцю	Перетворювач температури, вхід Pt100, вихід 4-20 мА	TMT162	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 18-3	Температура	-	0...50°C	Щит керування	Показувач температури, вхід 4-20 мА, індикація °C, сигналізація 20-35°C, живлення 220 В AC	ITM-11	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 19 - Розподіл дистилату								
Поз. 19-1	До бака	Лінія до бака 9	-	По місцю	Клапан з пневмоприводом, DN25, Kvs=8, нормально відкритий, керування від QIRCA при QE<1,3	SAMSON 3241	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 19-2	Положення до бака	Клапан до бака	0...100%	По місцю	Датчик положення, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	GE вбудований	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 19-3	Положення	-	-	По місцю	Електропневматичний позиціонер, вхід 4-20 мА, вихід 0,4-2 бар	SAMSON TROVIS 3730	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Контур 20 - Продувка колон								
Поз. 20-1	Продувка	Нижня частина колони 3	-	По місцю	Кульовий клапан з пневмоприводом, DN20, повнопрохідний	SAMSON Type 3940	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 20-2	Положення продувки	Клапан продувки	OPEN/CLOSE	По місцю	Датчик положення дискретний, 2 кінцеві вимикачі, контакти 250 В AC / 2 А	GE дискретний	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 20-3	Положення	-	-	По місцю	Соленоїдний клапан пневматичний, вхід 24 В DC	Блок керування	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 20-4	Продувка	-	-	Щит керування	Блок ручного керування, кнопки ВІДКР/ЗАКР, таймер періодичної продувки, живлення 220 В AC	HCI-02	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 21 - Верхній рівень бака								
Поз. 21-1	Рівень верхній	Накопичувальний бак 9	90%	По місцю	Датчик рівня поплавковий, уставка 90%, контакт 250 В AC / 5 А	Liquiphant M FTL51	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ

Поз. 21-2	Рівень верхній	-	90%	Щит керування	Прилад сигналізації, вхід дискретний 24 В DC, релейний вихід, жовта LED, живлення 220 В AC	LSA-02	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 22 - Нижній рівень бака								
Поз. 22-1	Рівень нижній	Накопичувальний бак 9	10%	По місцю	Датчик рівня поплавковий, уставка 10%, контакт 250 В AC / 5 А	Liquiphant M FTL51	1	ТОВ «Ендрес+Хаузер Україна», м. Київ
Поз. 22-2	Рівень нижній	-	10%	Щит керування	Прилад сигналізації, вхід дискретний 24 В DC, релейний вихід (блокування GE 23-1), червона LED, живлення 220 В AC	LSA-02	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ
Контур 23 - Відбір з бака								
Поз. 23-1	Відбір дистилляту	Вихід з бака 9	-	По місцю	Регулювальний клапан з пневмоприводом, DN25, 0,4-2 бар	SAMSON 3241	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 23-2	Положення відбору	Клапан відбору	0...100%	По місцю	Датчик положення інтегрований, вихід 4-20 мА, живлення 24 В DC	GE вбудований	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Поз. 23-3	Положення	-	-	По місцю	Електропневматичний позиціонер HART, вхід 4-20 мА, вихід 0,4-2 бар, живлення 24 В DC	SAMSON TROVIS 3730	1	ТОВ Самсон, м. Київ
Електроапаратура								
HL1-HL6	Технологічна сигналізація	-	-	Щит керування	Лампа сигнальна LED з червоним індикатором, 0,5 Вт, 24 В DC, d22 мм	ЛС-22Д	6	ТОВ «ІЕК Україна», м. Вишневе
HL7-HL12	Технологічна сигналізація	-	-	Щит керування	Лампа сигнальна LED з жовтим індикатором, параметри аналогічно HL1-6	ЛС-22Д	6	ТОВ «ІЕК Україна», м. Вишневе
HL13-HL16	Технологічна сигналізація	-	-	Щит керування	Лампа сигнальна LED з зеленим індикатором, параметри аналогічно HL1-6	ЛС-22Д	4	ТОВ «ІЕК Україна», м. Вишневе
KM1-KM9	Технологічна сигналізація	Ланцюги керування	24 В DC	Щит керування	Реле електромагнітне, AC 400V/DC 24V, контакти AC1 16A/250V, 4 перемикальні контакти, DIN-рейка	RM63	9	ТОВ «СВ АЛЬТЕРА», м. Київ

SA1-SA4	Вимикачі	Ланцюги керування	220 В AC	Щит керування	Перемикач поворотний запобіжного вимикання, 3 положення (0-I-II), 20 А, 380 В	ПВ2-16	4	ТОВ «ІЕК Україна», м. Вишневе
SB1-SB8	Кнопки керування	Ланцюги керування	24 В DC	Щит керування	Кнопка з підсвічуванням, типу "Пуск" (зелена) і "Стоп" (червона), d22 мм	КМЕ-4111	8	ТОВ «ІЕК Україна», м. Вишневе
FU1-FU10	Запобіжники	Ланцюги керування	220 В AC	Щит керування	Плавкий запобіжник, 6,3 А, 250 В AC, корпус керамічний, тип gL/gG	ПП-31	10	ТОВ «ІЕК Україна», м. Вишневе
QF1-QF5	Автоматичні вимикачі	Ланцюги керування	380 В AC	Щит керування	Автоматичний вимикач модульний, 3P, 16 А, характеристика C, 6 кА	BA47-29 3P C16	5	ТОВ «ІЕК Україна», м. Вишневе
Система керування								
ПЛК	Програмований контролер	-	-	Щит керування	ПЛК CPU 1515-2 PN, 150 нс/команду, 500 кБ/3 МБ, 2×Profinet, 1×Profibus DP, 16 DI/16 DO/4 AI/2 AO, живлення 24 В DC	SIMATIC S7-1500 CPU 1515-2 PN		ТОВ «Сіменс Україна», м. Київ
HMI	Панель оператора	-	-	Щит керування	Сенсорна панель, 12", 1280×800, Profinet, 4 USB, 512 МБ, живлення 24 В DC	SIMATIC HMI KTP1200 Basic		ТОВ «Сіменс Україна», м. Київ
БЖ-1, БЖ-2	Блоки живлення 24 В DC	Ланцюги живлення	24 В DC	Щит керування	Блок живлення стабілізований, вхід 85-264 В AC, вихід 24 В DC / 10 А (240 Вт), КЗ захист, DIN-рейка, ККД >90%	SITOP PSU100C 24V/10A		ТОВ «Сіменс Україна», м. Київ
-	Перетворювачі сигналів	Ланцюги вимірювання	-	Щит керування	Перетворювачі 4-20 мА з гальванічною ізоляцією, DIN-рейка, живлення 24 В DC	Phoenix Contact MINI MCR		Phoenix Contact, м. Київ
-	Інтерфейсні модулі RS-485	Ланцюги передачі даних	-	Щит керування	Модулі RS-485 / Profibus / Modbus, до 115,2 кбіт/с, ізоляція 2,5 кВ, живлення 24 В DC	IFM-RS485		Phoenix Contact, м. Київ
-	Кабель RS-485	Лінії передачі даних	-	Кабельні траси	Кабель екранований для RS-485, 2×2×0,5 мм ² , імпеданс 120 Ом, термінатор 120 Ом	LAPP UNITRONIC BUS RS485		LAPP Kabel, м. Київ

-	Кабель 24 В DC	Ланцюги живлення	24 В DC	Кабельні траси	Кабель силовий 2×1,5 мм ² , 300 В, екранований	ЗЗЦМ		Завод «Південкабель», м. Харків
-	Кабель 4-20 мА	Ланцюги вимірювання	-	Кабельні траси	Кабель екранований 2×0,75 мм ² для аналогових сигналів	КВВГ-П		Завод «Південкабель», м. Харків
-	Щит керування	-	-	Приміщення операторної	Шафа настінна IP54, 800×600×250 мм, з DIN-рейками, вентиляція, освітлення, замок	ЩМП-03	1	ТОВ «Електроцит», м. Київ