

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП - 03.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Андрій Братусь

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Братусь Андрій Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу видалення

парафінів з олив у бензиновому середовищі

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

доцент О.В.Кучмистенко
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1 А.Р.Братусь
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент Л.І.Фешанич
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент В.С.Борин
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент А.І. Лагойда
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ.

_____ /Лагойда А.І./

«___» _____ 2025 р

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Братусю Андрію Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу видалення парафінів з олив у бензиновому середовищі

керівник роботи Борин Василь Степанович, к.т.н., доцент

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 29 » травня 20 26 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 12.06.2026 року

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики, методичні вказівки, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналіз технологічного процесу депарафінізації олив у бензиновому середовищі.

Математичне моделювання об'єкта керування

Технічна реалізація процесу депарафінізації олив у бензиновому середовищі

Програмна реалізація системи керування

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Лист 1 – Функціональна схема автоматизації аміачного холодильника-кристалізатора – БР.АКП – 03.00.00.000 01

Лист 2 – Структурна схема каскадної системи автоматичного регулювання – БР.АКП – 03.00.000 02

Лист 3 – Проектний ескіз головної мнемосхеми SCADA-системи – БР.АКП – 03.00.000 03

Лист 4 – Блок-схема алгоритму протиаварійного захисту (ПАЗ) – БР.АКП – 03.00.000 04

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06 листопада 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу депарафінації олив у бензиновому середовищі.	15 лютого 2026	
2	Математичне моделювання об'єкта керування	25 березня 2026	
3	Технічна реалізація процесу депарафінації олив у бензиновому середовищі.	1 травня 2026	
4	Програмна реалізація системи керування	30 травня 2026	
5	Висновки	5 червня 2026	

Студент _____
(підпис)

А.Р.Братусь _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

В.С.Борин _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 84 сторінки друкованого тексту, 27 рисунків, 16 таблиць, 18 посилань на джерела.

Тема: «Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу видалення парафінів з олив у бензиновому середовищі».

Об'єкт дослідження: технологічний процес охолодження та кристалізації суміші в аміачному скребковому холодильнику установки депарафінації.

Мета роботи: удосконалення системи автоматизації температурного режиму аміачного холодильника-кристалізатора шляхом застосування сучасних інтелектуальних датчиків та цифрових протоколів передачі даних для мінімізації похибок керування.

Методи дослідження: методи теорії автоматичного керування та математичного моделювання, розрахунок у програмному комплексі ANSYS, параметрична ідентифікація у середовищі MATLAB.

Результати кваліфікаційної роботи: вирішено завдання удосконалення системи автоматизації температурного режиму аміачного холодильника-кристалізатора. Проведено аналіз існуючих систем керування, розроблено математичну модель та виконано чисельне моделювання процесу в ANSYS. Синтезовано каскадну систему автоматичного регулювання на базі ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 (Fail-Safe). Розроблено функціональну схему автоматизації, обрано сучасні інтелектуальні датчики та реалізовано алгоритми протиаварійного захисту (ПАЗ) рівня SIL 3.

Ключові слова: АМІАЧНИЙ ХОЛОДИЛЬНИК, ДЕПАРАФІНІЗАЦІЯ, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, SCADA-СИСТЕМА, ПРОТИАВАРІЙНИЙ ЗАХИСТ, КАСКАДНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 84 pages of printed text, 27 figures, 16 tables, 18 references.

Topic: "Improvement of the automation system for the technological process of removing paraffins from oils in a gasoline environment".

Object of research: the technological process of cooling and crystallization of the mixture in the ammonia scraper chiller of the dewaxing unit.

Purpose of the work: improvement of the temperature control automation system of an ammonia scraper chiller-crystallizer by applying modern smart sensors and digital data transfer protocols to minimize control errors.

Research methods: methods of automatic control theory and mathematical modeling, calculation in ANSYS software, parametric identification in the MATLAB environment.

Results of the qualification work: the problem of improving the temperature control automation system of an ammonia scraper chiller-crystallizer is solved. An analysis of existing control systems was conducted, a mathematical model was developed, and numerical simulation of the process was performed in ANSYS. A cascade automatic control system was synthesized based on the Siemens SIMATIC S7-1500 (Fail-Safe) PLC. A functional automation scheme was developed, modern smart sensors were selected, and SIL 3 emergency protection (SIS) algorithms were implemented.

Key words: AMMONIA CHILLER, DEWAXING, PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER, SCADA SYSTEM, EMERGENCY PROTECTION, CASCADE CONTROL SYSTEM.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДЕПАРАФІНІЗАЦІЇ ОЛИВ У БЕНЗИНОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ...	11
1.1 Технологія депарафінзації олив у бензиновому середовищі.....	11
1.2 Роль та принцип дії аміачного скребкового холодильника (кристалізатора).....	16
1.3 Аналіз існуючих систем автоматизації та постановка задачі дослідження.	20
1.4 Постановка задачі автоматизації.....	23
Висновки до розділу.....	24
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АМІАЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА.....	25
2.1 Математичний опис аміачного холодильника.....	25
2.2 Розрахунок моделі в ANSYS.....	29
2.3 Ідентифікація об'єкта керування.....	33
Висновки до розділу.....	37
3 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДЕПАРАФІНІЗАЦІЇ ОЛИВ У БЕНЗИНОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	38
3.1 Вибір технічних засобів автоматизації.....	38
3.2 Розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА).....	41
3.3 Специфікація засобів автоматизації.....	44
Висновки до розділу.....	50
4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	51
4.1 Обґрунтування вибору програмного середовища та апаратна конфігурація ПЛК.....	51
4.2 Розробка програмного забезпечення регуляторів та алгоритмів керування.....	59

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Братусь А.Р.			Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу видалення парафінів з олив у бензиновому середовищі	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив		Борин В.С.						
Рецензент		Фешанич Л.І.				ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.				Гр. АКП-22-1		
Затв.		Лагойда А.І.						

4.3 Розробка людино-машинного інтерфейсу (НМІ) системи керування.....	63
4.4 Реалізація алгоритмів протиаварійного захисту (ПАЗ).....	67
Висновки до розділу.....	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	78
ДОДАТОК А Функціональна схема автоматизації аміачного холодильника-кристалізатора.....	81
ДОДАТОК Б Структурна схема каскадної системи автоматичного регулювання	82
ДОДАТОК В Проектний ескіз головної мнемосхеми SCADA-системи.....	83
ДОДАТОК Г Блок-схема алгоритму протиаварійного захисту (ПАЗ).....	84

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Братусь А.Р.			Удосконалення системи автоматизації технологічного процесу видалення парафінів з олів у бензиновому середовищі	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив		Борин В.С.						
Рецензент		Фешанич Л.І.				ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.				Гр. АКП-22-1		
Затв.		Лагойда А.І.						

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗВТ — засіб вимірювальної техніки

ЛМІ — людино-машинний інтерфейс

ПАЗ — протиаварійний захист

ПЛК — програмований логічний контролер

САК — система автоматичного керування

САР — система автоматичного регулювання

ФСА — функціональна схема автоматизації

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

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

SIL — Safety Integrity Level (рівень повноти безпеки)

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Щоб нафтові оливи надійно працювали в механізмах, однією з головних вимог є зменшення температури їхнього застигання. У складі важких нафтопродуктів міститься значна кількість твердих високомолекулярних парафінів. При зниженні температури вони кристалізуються, утворюючи просторову решітку, яка блокує рідку фазу оливи, що призводить до різкого зростання в'язкості та втрати плинності. Для усунення цього недоліку на нафтопереробних підприємствах застосовують процес депарафінації із використанням вибіркового розчинників.

Основним апаратом депарафінації є скребковий аміачний холодильник-кристалізатор. Складність його автоматизації зумовлена нелінійністю фазових переходів, зростанням в'язкості розчину та великою інерційністю теплообміну. Використання традиційних систем контролю часто призводить до порушення термодинамічного балансу та зниження фільтрованості суспензії, що веде до перевитрати енергоресурсів компресорною станцією. З огляду на це, удосконалення системи керування на основі інтеграції прецизійного вимірювального обладнання та надійних архітектур регулювання є надзвичайно актуальною задачею, яка дозволить оптимізувати процес та максимізувати якість базових олив.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою бакалаврської роботи є удосконалення системи автоматизації температурного режиму аміачного холодильника-кристалізатора шляхом застосування сучасних інтелектуальних датчиків та цифрових протоколів передачі даних для мінімізації похибок керування. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз технологічного процесу депарафінації та виявити недоліки існуючих систем керування скребковими холодильниками.
2. Провести розрахунок теплових процесів апарата та виконати ідентифікацію об'єкта керування на основі експериментальних даних.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Обґрунтувати вибір високоточних інтелектуальних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та сучасних цифрових протоколів для підвищення метрологічної достовірності.
4. Розробити удосконалену функціональну схему автоматизації (ФСА) та підібрати мікропроцесорний комплекс технічних засобів (ПЛК, виконавчі механізми) для її реалізації.

Об'єкт дослідження – технологічний процес охолодження та кристалізації суміші в аміачному скребковому холодильнику установки депарафінації.

Предмет дослідження – удосконалена система автоматичного керування температурним режимом аміачного холодильника.

Методи дослідження. В основі роботи лежать методи теорії автоматичного керування та математичного моделювання. Для розрахунку розподілу температур та гідродинаміки застосовано програмний комплекс ANSYS. Для знаходження передавальних функцій об'єкта за каналами керування та збурення застосовано пакет Identification Toolbox у середовищі MATLAB.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення роботи полягає у вдосконаленні існуючої функціональної схеми автоматизації та обґрунтованому виборі прецизійних інтелектуальних засобів вимірювання. Запропоновані рішення мінімізувати похибки керування температурним режимом, уникнути термічного шоку парафінів та можуть бути використані при модернізації діючих установок депарафінації олив на нафтопереробних підприємствах.

Структура та обсяг роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Загальний обсяг розрахунково-пояснювальної записки становить 84 сторінки.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДЕПАРАФІНІЗАЦІЇ ОЛИВ У БЕНЗИНОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

1.1 Технологія депарафінізації олив у бензиновому середовищі

Виготовлення якісних базових олив вимагає використання депарафінізації для забезпечення надійної роботи мастил при низьких температурах. Дистилятні та залишкові оливні компоненти, які отримують під час вакуумної перегонки мазуту, містять у своєму складі велику кількість високомолекулярних аліфатичних вуглеводнів. Ці сполуки, представлені переважно н-алканами з довжиною ланцюга від C15 до C35 та церезинами, мають високі температури плавлення, такі компоненти спричиняють стрімку втрату рухливості та застигання оливи при зниженні температури навколишнього середовища.

При високих температурах парафіни повністю розчиняються в базовій оливі, проте під час охолодження, коли суміш досягає температури помутніння, починається процес кристалізації, протягом якого молекули парафіну об'єднуються і утворюють перші мікроскопічні тверді частинки. При подальшому охолодженні кристали парафіну починають інтенсивно рости та з'єднуватися між собою, утворюючи суцільну просторову ґратку, яка утримує рідку оливу. У результаті суміш перетворюється на густу гелеподібну масу і втрачає здатність нормально текти. За таких умов відокремити кристали від оливи стає фізично неможливо через величезний опір та різке зростання в'язкості. Вирішенням цієї проблеми є покращення плинності суміші шляхом додавання розчинника.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1.1 Вплив бензинових компонентів на в'язкість суміші та процес кристалізації

Для депарафінізації важких оливних дистилатів обґрунтовано використовувати легкі бензинові компоненти (зокрема бензин-розчинник Б-70). Головна фізична функція бензину полягає у розбавленні дисперсійного середовища. Його рухливі молекули проникають між макромолекулами оливи, збільшуючи вільний об'єм системи. Оскільки бензин Б-70 має дуже низьку в'язкість при мінусових температурах, його додавання робить суміш значно більш плинною. Експериментально доведено, що введення лише 15% цього розчинника до важкої оливи при температурі -30°C зменшує її в'язкість більш ніж у 100 разів.

У промислових умовах співвідношення розчинника до сировини становить від 2:1 до 4:1, що гарантує високу текучість фільтрату. Окрім зниження густини, бензин не лише зменшує в'язкість суміші, але й запобігає передчасному злипанню мікрокристалів парафіну. У такому розбавленому середовищі молекулам парафіну легше приєднуватися до кристалів, завдяки чому формуються великі, чітко оформлені кристали. Під час фільтрування вони утворюють пористий шар (петролатум), який не забиває тканину фільтрів і дозволяє швидко відділити рідку фазу.

Таблиця 1.1 — Фізико-хімічні властивості та технологічний вплив розчинника Б-70

Фізико-хімічні властивості розчинника Б-70	Значення / Вплив на технологічний процес
Фракційний склад (температура кипіння)	Забезпечує легку регенерацію розчинника з оливи шляхом відгону без ризику термічної деструкції базових компонентів.
Розчинювальна здатність	Повна взаємна розчинність з нафтовими та ароматичними вуглеводнями оливи; різке зниження розчинності н-алканів при температурі нижче 0°C .

Фізико-хімічні властивості розчинника Б-70	Значення / Вплив на технологічний процес
Хімічна інертність	Складається з легких аліфатичних вуглеводнів, які не взаємодіють з компонентами оливи та не впливають на її стабільність.

1.1.2 Опис типової технологічної схеми процесу

Промислова депарафінація оливи у розчині бензину є безперервним багатостадійним тепломасообмінним процесом. Технологічна лінія включає підготовку сировини, попереднє охолодження, глибоку кристалізацію, фільтрацію та регенерацію розчинника.

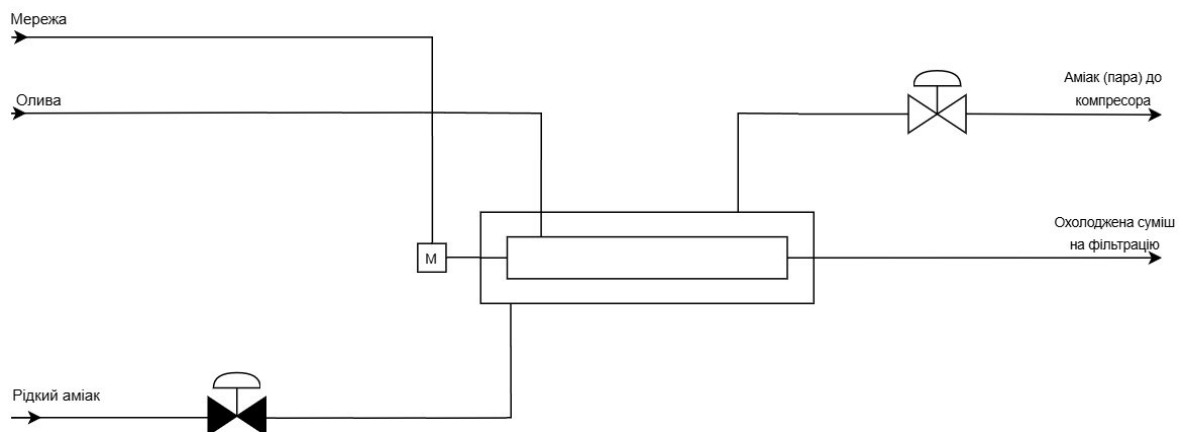


Рисунок 1.1 - Типова технологічна схема процесу кристалізації

1.1.3 Змішування сировини з бензином та термообробка

На початку процесу зневоднена олива ретельно перемішується з розчинником для отримання однорідної (гомогенної) суміші. Утворений розчин подають у парові підігрівачі, де температуру піднімають на 25 - 30°C вище температури помутніння оливи. Такий термічний вплив необхідний, щоб повністю знищити «термічну пам'ять» сировини, тобто розплавити всі існуючі

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

мікрочастинки парафіну. Якщо пропустити цю стадію термообробки, під час подальшого охолодження кристали почнуть рости хаотично, утворюючи щільний осад, здатний повністю заблокувати фільтрувальні апарати.

Таблиця 1.2 — Характеристика етапів каскадного охолодження сировини

Етап охолодження	Апаратне оформлення	Теплоносій / Холодоагент	Цільова температура суміші
Термічна обробка	Парові теплообмінники	Водяна пара	Вище точки помутніння на 25 - 30°C
Попереднє охолодження	Кожухотрубні холодильники	Промислова вода	+30...40°C
Регенеративне охолодження	Скребокві кристалізатори типу "труба в трубі"	Холодний фільтрат з вакуум-фільтрів	≈ 0... - 5°C

1.1.4 Попереднє та регенеративне охолодження

Щоб уникнути утворення дрібної маси, яку неможливо відфільтрувати, температуру слід знижувати поступово, інакше виникає так званий «температурний шок», через який кристали дрібнішають і забивають фільтри. Спочатку суміш охолоджують водою, далі в роботу вступають регенеративні теплообмінники типу «труба в трубі», в них гарячий розчин охолоджується зустрічним потоком холодного фільтрату, який повертається з вакуум-фільтрів. Завдяки такому обміну теплом розчин додатково охолоджується і сильно економить енергію підприємства. Щоб суміш не стала занадто густою, у потік між секціями додають холодний розчинник.

1.1.5 Глибоке охолодження у скребкових аміачних кристалізаторах

Щоб готова базова олива мала необхідну низьку температуру застигання, суспензію переохолоджують на 10-15°C нижче цільової точки застигання. Оскільки потенціал регенерації тут вже вичерпано, фінальний етап глибокого охолодження до -20... -29°C виконується за рахунок зовнішнього холодильного циклу у скребкових аміачних кристалізаторах. Апарат складається з блоків з'єднаних між собою подвійних труб, суспензія, яку потрібно охолодити, перекачується через центральну магістраль діаметром 150мм. У кільцевий зазор зовнішньої труби діаметром 200мм дозується рідкий аміак. Відбираючи тепло від суспензії, аміак кипить. Температура його кипіння в кожусі коливається від -30°C до -40°C і суворо контролюється компресорами, що регулюють тиск відсмоктування аміачних парів.

Найбільшою проблемою під час роботи кристалізатора є утворення ізолюючого шару парафіну на внутрішній поверхні труб. Оскільки коефіцієнт теплопровідності λ цього шару вкрай малий, він працює як теплоізолятор, блокуючи охолодження. Для очищення стінок конструкцією передбачено центральний вал, оснащений підпружиненими скребковими механізмами. Вони постійно здирають парафін зі стінок, вирішуючи при цьому три ключові задачі:

- Інтенсифікація теплообміну: очищення поверхні для стабільної теплопередачі до киплячого аміаку.
- Керування кристалізацією: зрізані мікрочастинки діють як вторинні центри (затравки) для формування однорідної крупнокристалічної структури.
- Підтримка гідродинамічної стабільності: постійне перемішування руйнує просторові ґратки парафіну, запобігаючи неконтрольованому зростанню гідравлічного опору.

Кінцевим етапом є направлення охолодженої суміші до блоку вакуумної фільтрації для розділення, при цьому кінцева якість готової оливи повністю залежить від стабільності температури після кристалізатора. Однак через

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складність теплообміну, нелінійний характер кипіння аміаку та постійну зміну в'язкості суміші, керувати цим процесом вручну практично неможливо. Навіть незначне коливання температури (на 1-2 градуси) спричиняє брак або економічні збитки. Саме тому виникає гостра потреба у синтезі ефективних алгоритмів автоматики, розробка якої неможлива без попереднього аналізу його динамічних властивостей.

1.2 Роль та принцип дії аміачного скребкового холодильника (кристалізатора)

1.2.1 Місце апарата в технологічній схемі

Фінальною стадією глибокого охолодження в процесі депарафінації є аміачний скребковий кристалізатор. Після попереднього охолодження водою та холодним фільтратом, суспензія доводиться тут до робочих значень (від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Саме в цей момент в'язкість системи різко підстрибує через масове виділення твердого парафіну, через що класичні теплообмінники одразу забиваються, єдиним технічним рішенням є застосування спеціалізованих кристалізаторів, здатних безперервно механічно очищати свої робочі поверхні.

1.2.2 Інженерна конструкція та механіка скребкової системи

Апарат являє собою багатосекційну конструкцію типу "труба в трубі". По внутрішній трубі рухається робоча суспензія, а в кільцевому просторі зовнішнього кожуха кипить рідкий аміак.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Таблиця 1.3 — Основні конструктивні вузли кристалізатора

Конструктивний вузол	Матеріальне виконання	Функціональне призначення
Внутрішня труба	Хонінгована легована сталь	Забезпечує бар'єр між холодоагентом та продуктом; формує основну поверхню теплообміну.
Зовнішній кожух	Вуглецева сталь	Утримує об'єм киплячого аміаку; формує простір для відведення парів холодоагенту.
Центральний вал	Масивна сталева конструкція	Передає крутний момент від приводу; витісняє "мертвий" об'єм по центру труби.
Підпружинені скребки	Пружинна або зносостійка сталь	Безперервно зрізають парафінову кірку; запобігають перекриттю перерізу труби.
Система приводу	Електродвигун, редуктор	Долає високий момент опору в'язкої суспензії під час обертання вала.

Ключовим робочим органом виступає масивний центральний вал, який обертається зі швидкістю 10–30 об/хв із підпружиненими скребками. Коли вал крутиться, металеві леза завдяки пружинам щільно прилягають до внутрішньої поверхні труби, зрізаючи твердий парафін. Знятий шар одразу спрямовується в центральну частину потоку суспензії, де ці дрібні фрагменти стають центрами вторинного зародкоутворення, завдяки чому нові кристали ростуть рівномірно, а переріз труби залишається вільним від закупорювання.

1.2.3 Термодинаміка теплообміну та кипіння аміаку

Відведення тепла відбувається за рахунок пухирчастого кипіння рідкого безводного аміаку. Згідно з рівнянням Клапейрона-Клаузіуса, температура кипіння холодоагента монотонно залежить від абсолютного тиску:

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T * (v_{\text{пар}} - v_{\text{рід}})}, \quad (1.1)$$

де L – прихована теплота пароутворення;

$v_{\text{пар}}$ – питомий об'єм пари;

$v_{\text{рід}}$ – питомий об'єм рідини.

З цього випливає висновок, що температура охолодження жорстко залежить від тиску відсмоктування парів аміаку.

Таблиця 1.4 — Залежність режиму від тиску пари аміаку

Тиск пари аміаку (МПа)	Відповідна температура кипіння (°C)	Характеристика режиму
~ 0,10 (Атмосферний)	-33,4	Стандартна точка кипіння. Максимальна глибина охолодження для даного тиску.
> 0,10	Вище -33,4	Знижений температурний напір, повільне охолодження суспензії.
< 0,10 (Вакуумування)	Нижче -33,4	Екстремальне охолодження (застосовується рідко через ризик підсосу повітря).

Регулюючи продуктивність компресора, система керування змінює тиск у випарнику. Зниження тиску миттєво знижує температуру кипіння, інтенсифікуючи відведення тепла. Цей безінерційний зв'язок є основним каналом керування.

1.2.4 Проблема термічного опору та гідродинаміка

Інтенсивність передачі тепла в кристалізаторі описується рівнянням Фур'є-Ньютона:

$$q = K * \Delta T_{\text{лог}} * F, \quad (1.2)$$

де K — загальний коефіцієнт теплопередачі;

$\Delta T_{\text{лог}}$ — середньологарифмічний температурний напір між середовищами;
F — площа поверхні теплообміну.

Загальний термічний опір системи R_E включає опори рідини, стінки, аміаку та шару кристалізованого парафіну:

$$R_E = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + R_f + \frac{1}{\alpha_{\text{кип}}}. \quad (1.3)$$

Оскільки парафін кристалізується на найхолоднішій внутрішній стінці і має вкрай низьку теплопровідність (близько 0,15-0,25 Вт/(м*К)), навіть мікроскопічний його шар блокує теплопередачу. Саме тому безперервне механічне видалення цієї кірки є критичною умовою роботи апарата. Додатково, інтенсивний рух скребків викликає сильну турбулізацію потоку, що не тільки вирівнює температурне поле по всьому перерізу, а й збиває високу структурну в'язкість рідини.

1.2.5 Характеристика холодильника як об'єкта керування

З позиції автоматизації, скребковий кристалізатор є багатовимірним, нелінійним об'єктом, ручне керування яким неможливе через низку факторів:

1. Нелінійна динаміка та стохастичні збурення: коливання витрати сировини та її хімічного складу постійно змінюють теплове навантаження.
2. Екстремальна зміна реології: при охолодженні в'язкість суміші експоненціально зростає, що робить об'єкт параметрично нестационарним.
3. Механічні збурення: зрізання парафіну вносить високочастотні флуктуації, а зношення скребків — низькочастотний дрейф термічного опору.
4. Транспортні запізнення: значна довжина труб створює запізнення, через яке ручне керування призводить до перерегулювання та автоколивань.

Підсумовуючи вищенаведене, можна стверджувати, що впровадження системи автоматичного керування є єдиним надійним способом забезпечити безпеку та стабільність процесу депарафінізації. Основним керуючим впливом

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

є тиск пари аміаку, керованою величиною — температура суспензії на виході. Детальне математичне обґрунтування об'єкта та синтез структури САК будуть наведені у наступних розділах роботи.

1.3 Аналіз існуючих систем автоматизації процесу охолодження в кристалізаторах

1.3.1 Традиційні одноконтурні АСУ (ПД-регулювання)

Розвиток систем автоматизації в нафтопереробці супроводжувався переходом до інтегрованих розподілених систем керування (DCS), проте базовим рішенням для контролю температури кристалізатора історично залишається одноконтурна САР. Її принцип дії полягає в наступному: первинний датчик фіксує температуру суспензії на виході, після чого сигнал передається на ПД-регулятор, який безпосередньо керує ступенем відкриття клапана на лінії відсмоктування парів аміаку.

З позиції ТАУ, об'єкт керування має суттєве транспортне запізнення T . Апроксимована передавальна функція за каналом "витрата парів аміаку — температура" має вигляд ланки з чистим запізненням:

$$W_{obj}(s) = \frac{k_{obj}e^{-Ts}}{T_{obj}s + 1}. \quad (1.4)$$

Наявність великого запізнення T суттєво погіршує динамічні характеристики об'єкта, зменшуючи запас стійкості за фазою. Через це інженери змушені налаштовувати ПД-регулятор на низьку швидкодію. Головний недолік цієї схеми — повна інерційність системи перед швидкими збуреннями від компресорної станції. Одноконтурна САР фіксує зміну тиску аміаку тільки після фактичної зміни температури продукту на виході. Це неминуче призводить до перерегулювання та провокує виникнення стійких автоколивальних режимів.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.2 Каскадні системи керування (промисловий стандарт)

Для подолання обмежень одноконтурного керування застосовують дворівневу каскадну САР.

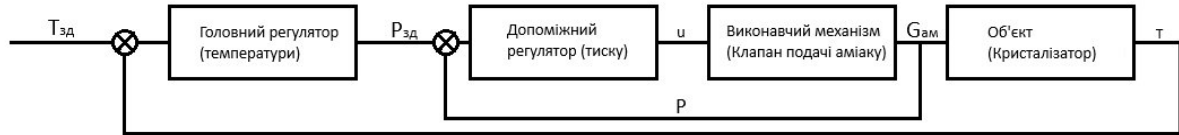


Рисунок 1.2 — Структурна схема каскадної системи керування температурою

де $T_{зд}$ — задане значення температури охолодженої оливи;

$R_{зд}$ — завдання для регулятора тиску (коригуючий сигнал);

u — керуючий вплив на клапан подачі аміаку;

$G_{ам}$ — витрата аміаку;

P — поточний тиск пари аміаку в кристалізаторі;

T — поточна температура оливи на виході з апарата.

- Внутрішній (стабілізуючий) контур включає датчик тиску аміаку, ПІ-регулятор та клапан. Оскільки газовий простір випарника майже не має транспортного запізнення, даний контур налаштовується на максимальну швидкодію. Він миттєво компенсує будь-які коливання тиску в колекторі, ще до впливу на температуру суспензії.
- Головний (зовнішній) контур містить датчик температури та ПІД-регулятор. Замість прямого впливу на виконавчий механізм, він формує динамічне завдання (setpoint) для внутрішнього контуру. Саме цей рівень управління бере на себе компенсацію повільних збурень, таких як коливання витрати сировини чи поступове обростання стінок парафіном.

									Арк.
									21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

каскадної архітектури з одночасним впровадженням сучасних інтелектуальних датчиків. Необхідним кроком є впровадження прецизійних засобів вимірювальної техніки та цифрових комунікаційних протоколів (наприклад, HART), які гарантують абсолютну точність передачі даних до контролера.

1.4 Постановка задачі автоматизації

Зважаючи на те, що скребковий кристалізатор є складним нестационарним об'єктом із розподіленими параметрами та значним транспортним запізненням, використання ручного режиму або традиційних одноконтурних систем регулювання не дозволяє досягти потрібної якості процесу при дії стохастичних збурень. Це призводить до критичних відхилень температурного градієнта, що робить розробку досконалішої багатоконтурної системи керування технологічно необхідною.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз технологічного процесу депарафінізації та виявити недоліки існуючих систем керування скребковими холодильниками.
2. Виконати математичну ідентифікацію кристалізатора як об'єкта керування з урахуванням розподіленості параметрів та транспортного запізнення.
3. Обґрунтувати вибір удосконаленої структури керування (каскадної САК) та виконати комп'ютерне моделювання для розрахунку оптимальних налаштувань регуляторів.
4. Обґрунтувати вибір високоточних інтелектуальних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та сучасних цифрових протоколів для підвищення метрологічної достовірності первинної інформації.
5. Розробити удосконалену функціональну схему автоматизації (ФСА) та підібрати сучасний мікропроцесорний комплекс технічних засобів (ПЛК, виконавчі механізми).

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу

У даному розділі проведено детальний аналіз технологічного процесу депарафінізації олив та визначено роль аміачного скребкового кристалізатора як складного об'єкта керування з нелінійною динамікою та значним транспортним запізненням. Розгляд існуючих систем автоматизації показав, що традиційні одноконтурні рішення є неефективними, тому для мінімізації похибок керування та уникнення термічного шоку парафінів обґрунтовано необхідність розробки вдосконаленої каскадної системи регулювання із застосуванням сучасних інтелектуальних засобів вимірювальної техніки.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АМІАЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА

2.1 Математичний опис аміачного холодильника

Базовим елементом для побудови математичної моделі виступає скребковий холодильник-кристалізатор. Конструктивно цей теплообмінний апарат побудовани за принципом коаксіальних циліндрів («труба в трубі»). Внутрішній простір призначений для транспортування та поступового охолодження нафтової сировини, а в кільцевому міжтрубному просторі відбувається кипіння холодоагенту (аміаку). Саме інтенсивне відведення тепла через стінку внутрішньої труби забезпечує зниження температури до точки кристалізації парафінів. Відповідна розрахункова схема процесу наведена на рисунку 2.1.

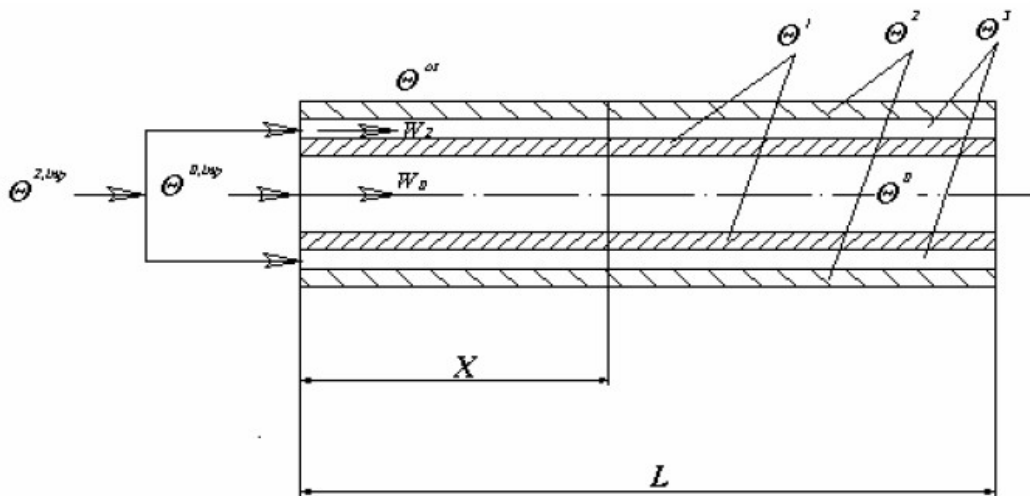


Рисунок 2.1 - Розрахункова схема аміачного холодильника

Математична модель динаміки теплообміну в апараті описується наступним комплексом диференціальних рівнянь:

$$T_0 \frac{\partial \theta^0}{\partial t} + T_0 W_0 \frac{\partial \theta^0}{\partial x} + \theta^0 = \theta^1, \quad (2.1)$$

$$T_1 \frac{\partial \theta^1}{\partial t} + \theta^1 = b_1 \theta^0 + b_2 \theta^2, \quad (2.2)$$

$$T_2 \frac{\partial \theta^2}{\partial t} + T_2 W_2 \frac{\partial \theta^2}{\partial x} + \theta^2 = b_3 \theta^1 + b_4 \theta^3, \quad (2.3)$$

$$T_3 \frac{\partial \theta^3}{\partial t} + \theta^3 = b_5 \theta^2 + b_6 \theta^{os}. \quad (2.4)$$

Для однозначного розв'язання наведеної системи необхідно задати наступні граничні умови на кінцях апарата:

$$\theta^0|_{x=0} = \theta^{0,inp}, \quad (2.5)$$

$$\theta^2|_{x=0} = \theta^{2,inp}. \quad (2.6)$$

Для синтезу мікропроцесорної системи керування зручніше оперувати комплексними змінними. Тому до рівнянь (2.1)–(2.4) застосовано пряме перетворення Лапласа за часовою координатою t (із припущенням про нульові початкові відхилення):

$$T_0 W_0 \frac{d\bar{\theta}^0}{dx} + (T_0 p + 1) \bar{\theta}^0 = \bar{\theta}^1, \quad (2.7)$$

$$(T_1 p + 1) \bar{\theta}^1 = b_1 \bar{\theta}^0 + b_2 \bar{\theta}^2, \quad (2.8)$$

$$T_2 W_2 \frac{d\bar{\theta}^2}{dx} + (T_2 p + 1) \bar{\theta}^2 = b_3 \bar{\theta}^1 + b_4 \bar{\theta}^3, \quad (2.9)$$

$$(T_3 p + 1) \bar{\theta}^3 = b_5 \bar{\theta}^2 + b_6 \bar{\theta}^{os}, \quad (2.10)$$

$$\bar{\theta}^0|_{x=0} = \bar{\theta}^{0,inp}, \quad (2.11)$$

$$\bar{\theta}^2|_{x=0} = \bar{\theta}^{2,inp}. \quad (2.12)$$

Для подальшого спрощення системи знайдемо явні вирази для температурних змінних $\bar{\theta}^1$ та $\bar{\theta}^3$ з рівнянь (2.8) і (2.10):

$$\bar{\theta}^1 = \frac{b_1}{T_1 p + 1} \bar{\theta}^0 + \frac{b_2}{T_1 p + 1} \bar{\theta}^2, \quad (2.13)$$

$$\bar{\theta}^3 = \frac{b_5}{T_1 p + 1} \bar{\theta}^2 + \frac{b_6}{T_1 p + 1} \bar{\theta}^{os}. \quad (2.14)$$

Виконаємо підстановку отриманих залежностей (2.13) у вихідні диференціальні рівняння (2.7) та (2.9):

$$T_0 W_0 \frac{d\bar{\theta}^0}{dx} + \left(T_0 p + 1 - \frac{b_1}{T_1 p + 1} \right) \bar{\theta}^0 = \frac{b_2}{T_1 p + 1} \bar{\theta}^2, \quad (2.15)$$

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

$$T_2 W_2 \frac{d\bar{\theta}^2}{dx} + \left(T_2 p + 1 - \frac{b_3 b_2}{T_1 p + 1} - \frac{b_4 b_5}{T_3 p + 1} \right) \bar{\theta}^2 = \quad (2.16)$$

$$= \frac{b_3 b_1}{T_1 p + 1} \bar{\theta}^0 + \frac{b_4 b_6}{T_3 p + 1} \bar{\theta}^{os}.$$

З отриманого співвідношення (2.15) виразимо температуру холодоагенту $\bar{\theta}^2$ і підставимо її в рівняння динаміки (2.9):

$$\bar{\theta}^2 = \frac{T_1 p + 1}{b_2} \left[T_0 W_0 \frac{d\bar{\theta}^0}{dx} + \left(T_0 p + 1 - \frac{b_1}{T_1 p + 1} \right) \bar{\theta}^0 \right], \quad (2.17)$$

$$T_2 W_2 \frac{T_1 p + 1}{b_2} \left[T_0 W_0 + \left(T_0 p + 1 - \frac{b_1}{T_1 p + 1} \right) \frac{d\bar{\theta}^0}{dx} \right] + \quad (2.18)$$

$$+ \frac{T_1 p + 1}{b_2} \times \left(T_2 p + 1 - \frac{b_3 b_2}{T_1 p + 1} - \frac{b_4 b_5}{T_3 p + 1} \right) x \times$$

$$\times \left[T_0 W_0 \cdot \frac{d\bar{\theta}^0}{dx} + \left(T_0 p + 1 - \frac{b_1}{T_1 p + 1} \right) \bar{\theta}^0 \right] =$$

$$= \frac{b_2 b_3}{T_1 p + 1} \bar{\theta}^0 + \frac{b_4 b_5}{T_3 p + 1} \bar{\theta}^{os}.$$

Введемо ряд умовних позначень для масивних дробових виразів:

$$a_2(p) = T_0 W_0 T_2 W_2 \frac{T_1 p + 1}{b_2}, \quad (2.19)$$

$$a_1(p) = T_0 W_0 \left(T_2 p + 1 - \frac{b_3 b_2}{T_1 p + 1} - \frac{b_4 b_5}{T_3 p + 1} \right) +$$

$$+ T_2 W_2 \left(T_0 p + 1 - \frac{b_1}{T_1 p + 1} \right) - \frac{T_1 p + 1}{b_2},$$

$$a_0(p) = \frac{T_1 p + 1}{b_2} \left(T_2 p + 1 - \frac{b_3 b_2}{T_1 p + 1} - \frac{b_4 b_5}{T_3 p + 1} \right) \times$$

$$\times \left(T_0 p + 1 - \frac{b_1}{T_1 p + 1} \right) - \frac{b_3 b_1}{T_1 p + 1},$$

$$b_{os}(p) = \frac{b_4 b_6}{T_3 p + 1}.$$

Після застосування цих заміन базове рівняння (2.18) запишеться у спрощеному вигляді:

$$a_2(p) \frac{d^2 \bar{\theta}^0}{dx^2} + a_1(p) \frac{d\bar{\theta}^0}{dx} + a_0(p) \bar{\theta}^0 = b_{os}(p) \bar{\theta}^{os}. \quad (2.20)$$

						Арк.
					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (2.20) шукаємо у вигляді суми:

$$\bar{\theta}^0 = \bar{\theta}_{\text{ВН}}^0 + \bar{\theta}_{\text{СВ}}^0. \quad (2.21)$$

Звідси вираз для вимушеної складової набуває простого вигляду:

$$\bar{\theta}_{\text{ВН}}^0 = \frac{b_{(os)}(p)}{a_0(p)} \bar{\theta}^{os}. \quad (2.22)$$

Для знаходження вільної складової перехідного процесу складемо відповідне характеристичне рівняння:

$$a_2(p)r^2 + a_1(p)r + a_0(p) = 0. \quad (2.23)$$

Корені даного квадратного рівняння знаходимо за класичною формулою:

$$r_{1,2}(p) = \frac{-a_1(p) \pm \sqrt{a_1^2(p) - 4a_2(p)a_0(p)}}{2a_2(p)}. \quad (2.24)$$

Таким чином, загальне рівняння температурного профілю (2.21) запишеться у вигляді:

$$\bar{\theta}^0 = \frac{b_{(os)}(p)}{a_0(p)} \bar{\theta}^{os} + c_1(p)e^{r_1x} + c_2(p)e^{r_2x}. \quad (2.25)$$

Невідомі коефіцієнти $c_1(p)$ та $c_2(p)$ визначаються шляхом підстановки крайових умов (2.11) і (2.12) у загальний розв'язок, що дає систему:

$$\begin{cases} \bar{\theta}^{0,inp} = \frac{b_{(os)}(p)}{a_0(p)} \bar{\theta}^{os} + c_1(p) + c_2(p) \\ \bar{\theta}^{2,inp} = \frac{T_1p + 1}{b_2}, \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} \bar{\theta}^{2,inp} = \frac{T_1p + 1}{b_2} \\ T_0W_0(c_1(p)r_1(p) + c_2(p)r_2(p)) + \\ + \left(T_0p + 1 - \frac{b_1}{T_1p + 1}\right) \left(\frac{b_{(os)}(p)}{a_0(p)} \bar{\theta}^{os} + c_1(p) + c_2(p)\right). \end{cases} \quad (2.27)$$

Сформована математична модель повністю описує динаміку об'єкта і є вихідною точкою для проведення 3D-моделювання процесу теплообміну в програмному комплексі ANSYS.

2.2 Розрахунок моделі в ANSYS

Для візуалізації температурних полів та підтвердження адекватності розробленої математичної моделі використано середовище скінченно-елементного аналізу ANSYS. Застосування цього комплексу дає змогу інтегрувати раніше отримані рівняння тепломасообміну в 3D-модель апарата, забезпечуючи достовірну картину температурних градієнтів.

З усього спектра доступних модулів для вирішення поставленої задачі. фокус дослідження в ANSYS спрямовано виключно на процеси термодинаміки та гідродинаміки потоків. Такий вибір обґрунтований необхідністю дослідити конвективний теплообмін через стінку внутрішньої труби кристалізатора та оцінити реальну швидкість охолодження нафтової суміші у різних перерізах апарата.

Побудова розрахункового простору здійснювалася за допомогою модулів геометричного моделювання та сіткових генераторів комплексу, завдяки чому вдалося створити якісну просторову дискретизацію об'єкта, що дозволяє мінімізувати похибки чисельного інтегрування при аналізі динаміки охолодження.

Геометричні параметри розрахункової моделі, представленої на рисунку 2.2, відповідають реальним промисловим зразкам аміачних холодильників. Модель має довжину 4 метри та складається з двох коаксіальних циліндрів: центрального каналу для транспортування оливи діаметром 150 мм та зовнішньої оболонки для кипіння аміаку діаметром 350 мм.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

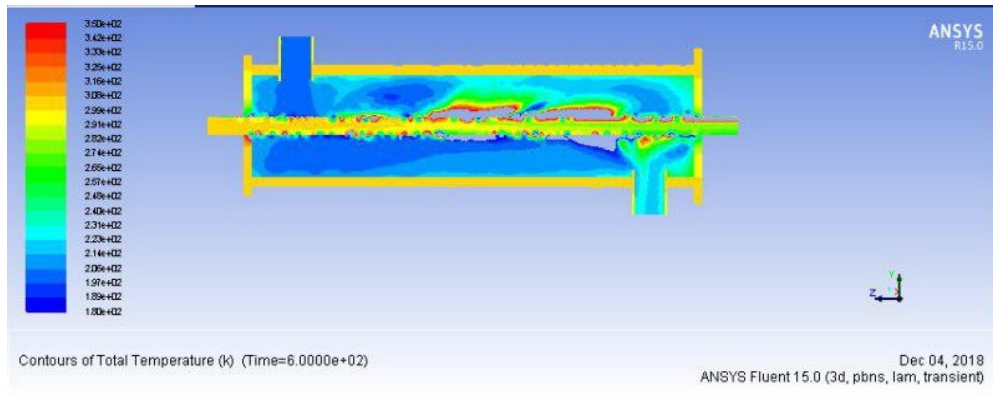


Рисунок 2.6 - Схема розподілення температур в апараті

Результатом нестационарного теплового аналізу є часові залежності температури охолодження продукту. Отримані графіки відображають динамічну реакцію теплового поля на ступінчасті збурення по каналах витрати теплоносіїв, а також при коливаннях початкової температури аміаку.

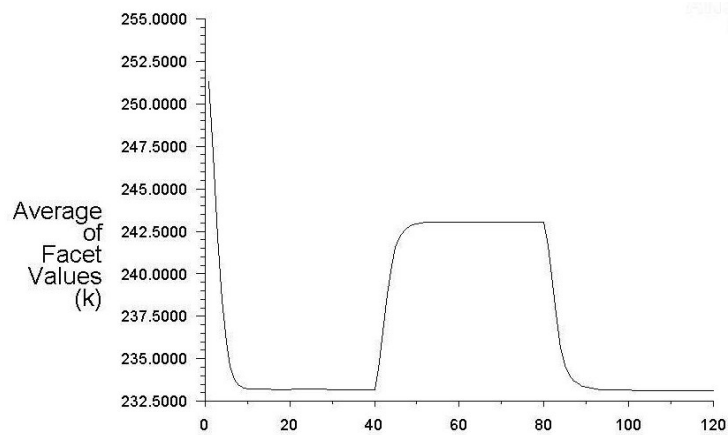


Рисунок 2.7 - Графік зміни температури оливи у часі

У результаті проведеного чисельного моделювання в ANSYS було згенеровано масив даних, що описує динаміку зміни температур у часі при внесенні збурень.

Таблиця 2.1 — Результати розрахунків

$t(\text{сек})$	$T_{\text{ол}}(^{\circ}\text{C})$	$F_{\text{ам}} \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$	$T_{\text{ам}}(^{\circ}\text{C})$	$F_{\text{ол}} \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$
20	-20	69	-40	31
40	-21	69	-40	31
60	-22	69	-40	31
80	-23	69	-40	31

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

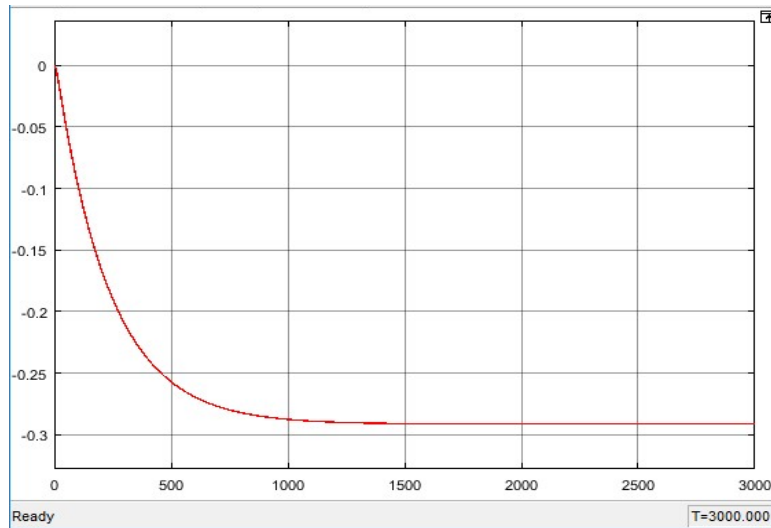


Рисунок 2.12 - Реакція системи по каналу витрата аміаку – температура
ОЛИВИ

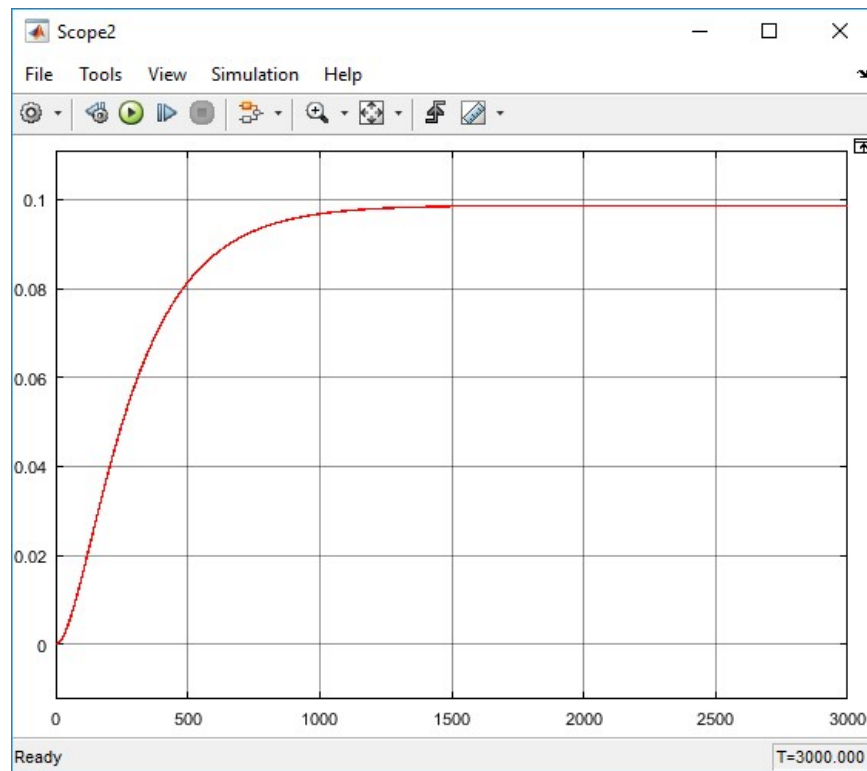


Рисунок 2.13 - Реакція системи по каналу температура аміаку –
температура оливи

3 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДЕПАРАФІНІЗАЦІЇ ОЛИВ У БЕНЗИНОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

3.1 Вибір технічних засобів автоматизації

Застосування традиційних одноконтурних систем для керування процесом кристалізації в аміачних холодильниках є неефективним через велику теплову ємність конструкції, а також через наявність тривалого транспортного запізнення. Для вирішення цієї проблеми та забезпечення високої точності стабілізації температурного режиму, проектується каскадна структура системи автоматичного регулювання (САР).

Параметри автоматичного регулювання. Температура охолодженої суміші на виході з кристалізатора є головним критерієм зовнішнього контуру каскадної САР. Вона безпосередньо впливає на кінетику кристалізації та гарантує досягнення необхідної температури застигання оливи. Порушення заданого температурного режиму провокує масову дрібнокристалічну нуклеацію парафінів. Як наслідок, знижується пропускна здатність барабанних вакуум-фільтрів на наступному етапі виробництва.

Допоміжним параметром внутрішнього контуру є абсолютний тиск пари киплячого аміаку у випарному (міжтрубному) просторі. Обґрунтування такого вибору базується на термодинамічному рівнянні фазової рівноваги Клапейрона-Клаузіуса:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P \Delta H_{vap}}{R T^2}$$

Згідно з цим рівнянням, температура кипіння аміаку жорстко прив'язана до його тиску. Регулювання охолодження шляхом зміни витрати рідкого холодоагенту супроводжується значним транспортним запізненням, тоді як дроселювання парів на лінії всмоктування компресора миттєво змінює тиск і температуру кипіння по всій довжині апарата. Така конфігурація внутрішнього

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

контуру забезпечує превентивну компенсацію теплових збурень ще до того, як вони вплинуть на масивний потік сировини.

Параметри інформаційно-вимірювальної системи (індикації). Для забезпечення персоналу достовірною інформацією та роботи систем захисту передбачено безперервний контроль наступних величин:

1. Витрата сировини на вході: визначає загальне теплове навантаження на апарат та час перебування продукту в зоні охолодження. Також впливає на гідродинамічний режим і швидкість потоку у внутрішніх трубах.
2. Температура сировини на вході: це головне теплове збурення в системі, яке виникає через нестабільність роботи попередніх регенеративних теплообмінників. Необхідна для автоматичного розрахунку теплового балансу.
3. Рівень рідкого аміаку: підтримання номінального рівня гарантує повне змочування теплообмінних труб для забезпечення максимальної ефективності теплопередачі. Зниження рівня веде до падіння ефективності, а перевищення створює загрозу гідравлічного удару в компресорі.
4. Сила струму двигуна скребкових механізмів: виконує функцію непрямого індикатора товщини парафінового шару на стінках. Цей параметр дозволяє в режимі реального часу контролювати крутний момент та захищає механізм від заклинювання.

Система протиаварійного захисту (ПАЗ) та сигналізації. Враховуючи використання вибухопожежонебезпечних речовин (бензин, мастильні дистиляти, аміак), кристалізатор оснащується комплексом ПАЗ, який відповідає вимогам НПАОП 29.23-1.04-90. Алгоритм спрацьовування систем безпеки при досягненні предаварійних меж (High-High або Low-Low) наведено в таблиці 3.1.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 — Логічна матриця спрацьовування системи протиаварійного захисту (ПАЗ)

Контрольований параметр	Аварійна ситуація (Уставка)	Алгоритм дії системи ПАЗ
Температура суміші на виході	Дуже висока (НН)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Закриття відсічного клапана сировини. 2. Відкриття байпаса (рециркуляція).
Рівень рідкого аміаку	Дуже низький (LL)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Відкриття клапана підживлення. 2. Зупинка компресора відкачування парів.
Рівень рідкого аміаку	Дуже високий (НН)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Закриття клапана підживлення. 2. Екстрена зупинка компресора (захист від гідроудару).
Сила струму двигуна скребків	Перевантаження (НН)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Знеструмлення електродвигуна приводу. 2. Припинення подачі холодоагенту.

3.2 Розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА)

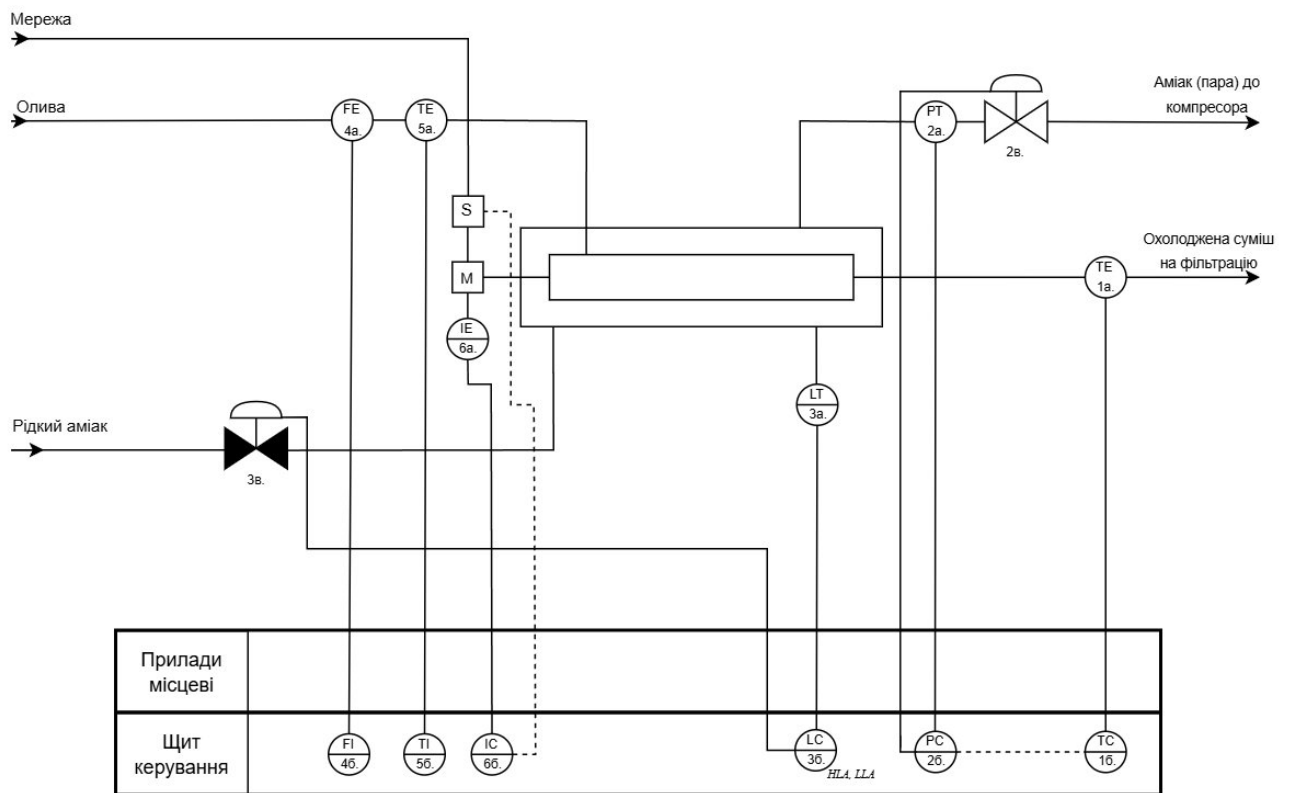


Рисунок 3.1 — Функціональна схема автоматизації аміачного холодильника-кристалізатора

Подана вище функціональна схема визначає структуру вузлів автоматичного контролю, керування та захисту технологічного процесу депарафінації. Система керування базується на застосуванні сучасного ПЛК, що дозволяє реалізувати каскадні закони регулювання та складні алгоритми протиаварійного захисту.

Функціональна схема автоматизації включає наступні основні контури:

Контури 1 та 2: Каскадне керування температурним режимом Для забезпечення прецизійної кінцевої температури охолодженої суміші та компенсації зовнішніх теплових коливань використовується каскадна система регулювання. Головний контур: Первинний перетворювач температури (поз. 1а), встановлений на вихідному трубопроводі продукту, безперервно вимірює температуру та фіксує поточну температуру і передає дані на головний регулятор (поз. 1б) у шафі ПЛК. Цей регулятор порівнює фактичну температуру з

технологічною нормою і формує змінне завдання для внутрішнього контуру. Внутрішній контур: Датчик тиску (поз. 2а) вимірює абсолютний тиск пари киплячого аміаку в міжтрубному просторі апарата, після чого підпорядкований регулятор тиску (поз. 2б) зіставляє цю фактичну величину із динамічним завданням із завдання від регулятора 1б. На основі розрахованої розбіжності формується керуючий сигнал на виконавчий механізм — регулюючий клапан (поз. 2в), змонтований на лінії всмоктування компресора. Відкриття клапана знижує тиск, миттєво зменшуючи температуру кипіння холодоагенту.

Контур 3: Стабілізація рівня рідкого аміаку У компресорі передбачено контур стабілізації рівня для забезпечення максимальної площі теплообміну та запобігання гідродамам. Датчик (поз. 3а) вимірює рівень киплячого середовища та передає дані на регулятор (поз. 3б), після чого регулятор здійснює вплив на нормально закритий клапан підживлення (поз. 3в), що встановлений на лінії подачі рідкого аміаку. У контурі програмно реалізована сигналізація аварійного верхнього (HLA) та нижнього (LLA) рівнів.

Контури 4 та 5: Інформаційний контроль параметрів сировини ПЛК безперервно збирає дані про вхідний потік для розрахунку поточного матеріального і теплового балансу. Для цього на трубопроводі подачі суміші встановлено датчик витрати (поз. 4а) та перетворювач температури (поз. 5а), сигнали яких передаються на аналогові входи контролера для індикації на панелі оператора та архівації.

Контур 6: Захист скребкових механізмів Для запобігання поломці вала при надмірному загустінні продукту, ФСА містить спеціальний контур електромеханічного захисту скребоків. Трансформатор струму (поз. 6а), встановлений у шафі керування двигуном, вимірює навантаження статора. Коли опір обертанню перевищує допустиму межу (понад 8,5 Нм), контролер формує дискретний сигнал на відключення магнітного пускача. Обертання вала негайно припиняється й одночасно активуються алгоритми припинення подачі холодоагенту.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Для зручності читання та побудови графічної частини проекту специфікація умовних позначень контурів зведена у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 — Специфікація графічних умовних позначень ФСА

Контур	Поз.	Призначення елемента	Розташування (ДСТУ)	Літерний код
1	1a	Перетворювач температури суміші на виході	За місцем (на трубі)	TE
	1б	Регулятор температури (головний)	На щиті керування (ПЛК)	TC (TIC)
2	2a	Датчик тиску пари аміаку	За місцем (на апараті)	PT
	2б	Регулятор тиску (підпорядкований)	На щиті керування (ПЛК)	PC (PIC)
	2в	Регулюючий клапан тиску	За місцем	PV
3	3a	Датчик рівня рідкого аміаку	За місцем (на апараті)	LE (LT)
	3б	Регулятор рівня та сигналізація (HLA, LLA)	На щиті керування (ПЛК)	LC (LIC)

Контур	Поз.	Призначення елемента	Розташування (ДСТУ)	Літерний код
	3в	Клапан підживлення рідким аміаком	За місцем	LV
4	4a	Датчик масової витрати сировини	За місцем (на трубі)	FE (FT)
5	5a	Перетворювач температури сировини на вході	За місцем (на трубі)	TE
6	6a	Датчик струму електродвигуна скребків	Шафа двигунів (МСС)	IE (IT)

3.3 Специфікація засобів автоматизації

Специфіка процесу депарафінізації в аміачному кристалізаторі вимагає використання обладнання, адаптованого до роботи у вибухонебезпечних та агресивних токсичних середовищах (Зона 1 або Зона 0). Усі підібрані польові прилади мають відповідне вибухозахищене виконання (Ex d або Ex ia) та підтримують передачу даних за промисловим стандартом 4-20 мА, який доповнено протоколом HART для трансляції розширеної діагностичної інформації.

Вибір програмованого логічного контролера (ПЛК). Апаратно-програмним ядром проектованої системи обрано сучасний промисловий контролер Siemens SIMATIC серії S7-1500 із процесором класу безпеки Fail-safe

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

(модель CPU 1515F-2 PN). Технологія Safety Integrated дозволяє одному пристрою одночасно виконувати завдання стабілізації технологічних параметрів та реалізовувати сценарії захисного блокування об'єкта. Це значно підвищує надійність системи та забезпечує рівень повноти безпеки до SIL 3.

Вибір первинних вимірювальних перетворювачів. Для забезпечення прецизійного вимірювання в надважких умовах експлуатації підібрано наступне обладнання:

- Температура (Поз. 1а, 5а): Використовуються платинові термоперетворювачі опору WİKA TR10 (Pt100). Для захисту крихкого платинового сенсора від гідродинамічних ударів високов'язкої сировини та механічного пошкодження обертовими скребками, прилади обов'язково встановлюються у суцільноточених вибухонепроникних гільзах. Зовнішній вигляд обраного термоперетворювача наведено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 — Термоперетворювач опору WİKA TR10 у захисному виконанні

- Тиск пари аміаку (Поз. 2а): Обрано інтелектуальні перетворювачі Yokogawa EJA110E з цифровим резонансним кремнієвим сенсором DPharp. Прилад оснащено системою подвійного ущільнення (Dual Seal) та тефлоновим покриттям для безаварійної роботи у високоагресивному

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аміачному середовищі. Зовнішній вигляд приладу представлено на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 — Інтелектуальний перетворювач тиску Yokogawa EJA110E

- Рівень рідкого аміаку (Поз. 3а): Застосовуються мікрохвильові радарні рівнеміри VEGAFLEX 81 хвильовідного типу. Цей метод вимірювання абсолютно не залежить від інтенсивного кипіння середовища та утворення піни. Унікальне ущільнення з боросилікатного скла гарантовано блокує дифузію токсичних молекул аміаку в електронний блок приладу. Загальний вигляд радарного рівнеміра представлено на рисунку 3.4

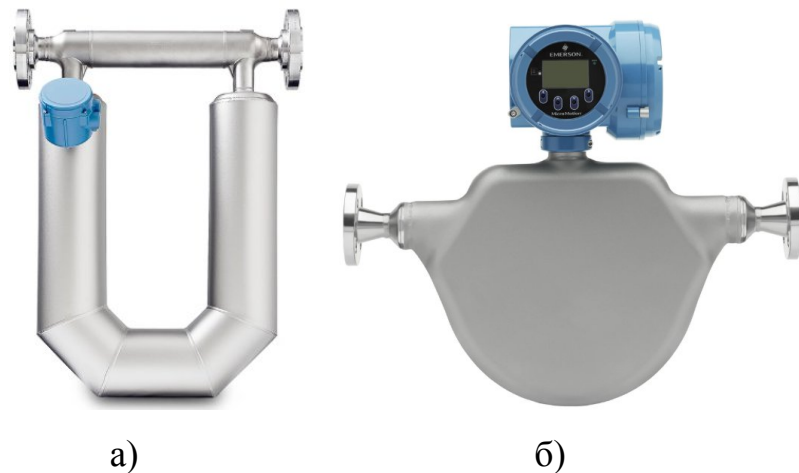


Рисунок 3.4 — Промисловий радарний рівнемір

- Витрата сировини (Поз. 4а): Використовуються масові коріолісові витратоміри Emerson Micro Motion ELITE. Вони здійснюють пряме вимірювання масової витрати, яке не залежить від нелінійної зміни

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

в'язкості суспензії під час охолодження. Зовнішній вигляд складових частин витратоміра наведено на рисунку 3.5.



- а — первинний вимірювальний перетворювач (сенсор серії CMF);
б — вимірювальний трансмітер (інтерфейсний блок серії 2700).

Рисунок 3.5 — Масовий Коріолісовий витратомір Emerson Micro Motion ELITE:

- Захист двигуна скребків (Поз. 6а): Для онлайн-діагностики крутного моменту застосовується інтелектуальна система керування двигунами Siemens SIMOCODE pro V. Шляхом постійного аналізу споживаної активної потужності система превентивно виявляє налипання парафіну та запобігає заклинюванню механізму. Зовнішній вигляд системи у складі модулів захисту та панелі керування наведено на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 — Інтелектуальна система керування двигунами Siemens SIMOCODE pro V

Продовження таблиці 3.3

2а	Перетворювач абсолютного тиску	EJA110E (DPharp)	Yokogawa	4-20 мА + HART, Ex ia
3а	Хвильовідний радарний рівнемір	VEGAFLEX 81	VEGA	4-20 мА + HART, Ex d / Ex ia
4а	Масовий коріолісовий витратомір	Micro Motion ELITE	Emerson	4-20 мА + HART, Ex d
6а	Система керування двигуном	SIMOCODE pro V	Siemens	PROFINET / Моніторинг потужності
Позиція за ФСА	Найменування обладнання	Тип (Модель) приладу / пристрою	Виробник	Примітка (інтерфейс, Ex-захист)
2в, 3в	Регулюючий клапан з пневмоприводом	Type 3241 / Пневмопривод 3271	SAMSON	Електропневматичний позиціонер, fail-safe захист
Контур ПАЗ	Соленоїдний клапан блокування	Серія 3963	SAMSON	Апаратне резервування для SIL 3

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Висновки до розділу

У розділі здійснено вибір комплексу технічних засобів для реалізації каскадної системи керування та системи протиаварійного захисту (ПАЗ). Розроблено функціональну схему автоматизації, базовим апаратно-обчислювальним ядром якої обрано програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1500 класу Fail-Safe. Підбрано сучасні інтелектуальні польові прилади у вибухозахищеному виконанні (датчики температури WİKA, тиску Yokogawa, рівня VEGA, витрати Emerson) та надійні пневматичні виконавчі механізми Samson, що гарантує високу метрологічну достовірність та безпеку процесу.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1 Обґрунтування вибору програмного середовища та апаратна конфігурація ПЛК

4.1.1 Загальна характеристика середовища TIA Portal

Реалізація удосконаленої каскадної системи автоматичного керування (САК) температурним режимом скребкового аміачного холодильника-кристалізатора вимагає застосування інструментальних програмних засобів, здатних забезпечити найвищий рівень інтеграції апаратних, комунікаційних та алгоритмічних компонентів. З огляду на високу нелінійність процесу депарафінізації, стрімке зростання в'язкості середовища під час фазових переходів парафінів, а також жорсткі вимоги до протиаварійного захисту у вибухонебезпечному середовищі, базовим програмним комплексом для конфігурації мікропроцесорної системи обрано середовище Totally Integrated Automation (TIA) Portal версії V17. Вибір цієї платформи обґрунтовується переходом від концепції ізольованих інструментів програмування до єдиної екосистеми з централізованою об'єктно-орієнтованою базою даних.

Фундаментальною перевагою середовища TIA Portal V17 є реалізація наскрізної символічної адресації та єдиної системи управління пам'яттю. Якщо в застарілих архітектурах (наприклад, STEP 7 V5.5) розробник був змушений оперувати абсолютними адресами та окремо налаштовувати контролер і HMI, дана екосистема ліквідує ризик неузгодженості даних завдяки використанню суворо типізованих структур даних (PLC Data Types, або UDT). Для автоматизації кристалізатора, кожен складний польовий пристрій, такий як електропневматичний регулюючий клапан Samson 3241 або масовий коріолісовий витратомір Micro Motion ELITE, описується єдиною структурою UDT. Ця структура інкапсулює первинну технологічну змінну, повний спектр

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

діагностичних статусів, меж тривоги (High-High, Low-Low) та статусів відмови (Fail-Safe states). Створений об'єкт UDT автоматично успадковується всіма рівнями системи: від організаційних блоків (OB) у пам'яті контролера до графічних елементів (Faceplates) у системі візуалізації WinCC.

Скребокний кристалізатор є об'єктом підвищеної небезпеки через використання токсичного безводного аміаку, що формує жорсткі вимоги до системи протиаварійного захисту (ПАЗ). Програмне середовище TIA Portal V17 включає інтегрований пакет STEP 7 Safety Advanced, який дозволяє розробляти логіку протиаварійного захисту (ПАЗ) безпосередньо в середовищі керування, гарантуючи відповідність рівню SIL 3 згідно зі стандартом IEC 61508. Для досягнення цієї надійності, алгоритми ПАЗ генеруються за принципом часового та логічного диверсифікування: компілятор автоматично створює дубльований тіньовий код, який виконується в інвертованій формі із застосуванням сторожових таймерів (Watchdog Timers). Під час кожного циклу контролера процесор порівнює результати виконання основного та дубльованого алгоритмів, завдяки чому, будь-яке відхилення миттєво переводить об'єкт у безпечний стан, ініціюючи закриття пневматичних клапанів Samson та знеструмлення двигуна скребокного вала.

Для налаштування систем автоматичного регулювання з великим транспортним запізненням, яким є багатотонний кристалізатор, застосовується вбудований інструментарій PID-Tuning, який дозволяє безпечно розрахувати оптимальні коефіцієнти посилення K_p , часу інтегрування T_i та диференціювання T_d для каскадної архітектури. Аналіз динаміки системи в реальному часі забезпечується функцією Trace, що здійснює запис динаміки процесів у реальному часі безпосередньо у внутрішню пам'ять процесора з дискретизацією, що дорівнює часу робочого циклу контролера, для подальшої математичної обробки. Для попередньої верифікації моделі передбачено використання симулятора PLCSIM Advanced, який створює цифровий двійник ПЛК із повною емуляцією мережевих стеків.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

4.1.2 Апаратна архітектура ПЛК: Обґрунтування вибору CPU 1515F-2

PN

У якості апаратно-обчислювального ядра проектованої каскадної системи керування обрано програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1500 (модель CPU 1515F-2 PN, 6ES7515-2FM02-0AB0). Швидкодія обчислювального ядра забезпечує високу продуктивність: час виконання однієї бітової логічної операції становить 30 нс, операцій зі словами — 36 нс, арифметичних дій з фіксованою комою — 48 нс, а операцій з рухомою комою (Floating-point arithmetic) — 192 нс. Така обчислювальна потужність дозволяє в режимі реального часу виконувати інтенсивні розрахунки за стандартом IEEE 754, необхідні для коректної обробки нелінійних сигналів датчиків витрати та реалізації алгоритмів каскадного регулювання в межах одного робочого циклу контролера.

Робоча пам'ять (Work Memory) контролера структурована як два незалежні сегменти: 750 КБ виділено виключно для виконання програмного коду, та 3 МБ — для зберігання змінних і структур даних, що запобігає фрагментації оперативної пам'яті. Водночас завантажувальна пам'ять (Load Memory) винесена на зовнішній енергонезалежний носій — SIMATIC Memory Card. Швидкість обміну даними на внутрішній шині (Backplane Bus) завдяки високошвидкісному послідовному інтерфейсу дозволяє звести час реакції системи до мінімуму, що критично для стабільності внутрішнього контуру регулювання тиску аміаку. Літера "F" в маркуванні CPU позначає Fail-Safe — підтримку вбудованих функцій безпеки, завдяки чому, один центральний процесор здатний паралельно і незалежно обробляти як стандартні алгоритми оптимізації процесу кристалізації, так і жорсткі алгоритми ПАЗ із сертифікацією SIL 3. Комунікація між F-модулями та процесором здійснюється за технологією PROFI-safe на базі принципу "чорного каналу" (Black Channel), що додає до стандартних телеграм часові мітки, лічильники послідовності та розширений CRC-код для перевірки цілісності даних.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Щоб підключити периферійне обладнання, в контролері CPU 1515F-2 PN використовуються незалежні інтерфейси PROFINET. Перший порт (X1) потрібен для передачі даних у реальному часі (протокол PROFINET IRT), а другий (X2) використовується для маршрутизації та зв'язку з верхнім рівнем — SCADA-системою. Від використання старої польової шини PROFIBUS DP було вирішено відмовитись на користь PROFINET з кількох вагомих причин:

- Вища пропускна здатність. Мережа PROFIBUS DP має фізичне обмеження швидкості до 12 Мбіт/с, що створює «вузьке місце», коли треба передавати багато діагностичної інформації від модулів керування двигунами (SIMOCODE pro V), натомість PROFINET працює на базі стандарту Industrial Ethernet зі швидкістю 100 Мбіт/с у повнодуплексному режимі.
- Детермінованість та гарантований час доставки. Завдяки технології IRT дані передаються без затримок (джитер становить менше 1 мс). Це критично важливо для каскадного керування, оскільки сигнали від датчика тиску Yokogawa повинні надходити на ПД-регулятор внутрішнього контуру чітко за розкладом робочого циклу контролера.
- Відмовостійкість (кільцева топологія MRP). Оскільки мережеві пристрої мають вбудовані двопортові комутатори, ми можемо об'єднати модулі SIMOCODE у кільцеву топологію. Якщо десь на лінії станеться обрив кабелю, протокол Media Redundancy Protocol (MRP) автоматично перенаправить сигнал іншим маршрутом менш ніж за 200 мілісекунд, що унеможливорює аварійну зупинку.

4.1.3 Конфігурація модулів введення-виведення та парадигма HART-діагностики

Для збору даних від аналогових датчиків із сигналом 4-20 мА у роботі обрано модулі стандартного класу (ST). Конфігурація аналогового введення реалізована на базі модуля AI 8xU/I/RTD/TC ST (замовний номер 6ES7531-7KF00-0AB0), а для керування клапанами-регуляторами застосовано модуль аналогового виводу

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

AQ 4xU/I ST (замовний номер 6ES7532-5HD00-0AB0). Оскільки сам кристалізатор є дуже інерційним об'єктом і процеси в ньому вимірюються десятками секунд, встановлювати дорогі високошвидкісні модулі (High Speed) немає технічного сенсу. Обрані модулі серії ST повністю задовольняють вимоги процесу та забезпечують такі показники:

- Роздільна здатність: Вбудований АЦП має 16 біт, що дозволяє розбити робочий діапазон 4-20 мА на 27648 кроків. Завдяки цьому система фіксує найменші коливання температури (менше ніж 0,1 °С), що важливо для точної роботи головного ПІД-регулятора каскаду.
- Швидкість циклу: Одне перетворення на канал займає 62,5 мс. Найбільш динамічним контуром у системі є вимірювання тиску парів аміаку (датчик Yokogawa EJA110E), але навіть там стала часу становить близько 2-3 секунд. Тому швидкодії стандартного модуля вистачає з великим запасом.
- Апаратна діагностика: Модулі ST підтримують функцію визначення обриву лінії (Wire Break). Для її коректної роботи виходи налаштовуються саме на діапазон 4-20 мА. Якщо провід до клапана Samson випадково обірветься, струм впаде до нуля. Модуль миттєво зафіксує це падіння та видасть апаратну помилку, яка переведе систему в безпечний режим (Fail-Safe стан).

Усе польове обладнання (датчики Wika TR10, VEGAFLEX 81, Micro Motion ELITE та позиціонери Samson) передає вимірювання за допомогою стандарту 4-20 мА з підтримкою цифрового протоколу HART. Поверх основного аналогового сигналу накладається високочастотна синусоїда (модуляція Bell 202, де "1" — це 1200 Гц, а "0" — 2200 Гц). Застосування модулів класу ST дозволяє ефективно розділити ці потоки даних. Їхні вбудовані фільтри низьких частот відсікають HART-складову, тому в пам'ять ПЛК надходить чистий аналоговий струм. Зі свого боку, цифрові дані (статуси пристроїв, діагностика) зчитуються паралельно через HART-мультиплексори на інженерну станцію SIMATIC PDM. Це рішення дозволяє повністю розвантажити центральний процесор від обробки

										Арк.
										55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

допоміжних текстових повідомлень і гарантує чітке виконання каскадних ПІД-алгоритмів.

Щоб захистити вал кристалізатора від заклинювання через налипання парафіну, у системі застосовано модуль керування двигунами Siemens SIMOCODE pro V PN, який підключається безпосередньо у мережу PROFINET. Пристрій контролює не лише струм, а й обчислює активну споживану потужність двигуна в реальному часі. Цей параметр прямо відображає механічний опір на скребках і циклічно передається в пам'ять CPU 1515F-2 PN. Якщо навантаження досягає предаварійного порогу, контролер активує захисний алгоритм: перекриває подачу рідкого аміаку і дає команду системі SIMOCODE на безпечну зупинку приводу.

4.1.4 Зведена специфікація апаратно-комунікаційної конфігурації ПЛК

На основі описаних вище вимог було сформовано кінцеву архітектуру апаратного комплексу для керування процесом депарафінізації. Повний перелік обраних модулів ПЛК та польового обладнання наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 — Зведена специфікація технічних засобів автоматизації мікропроцесорного комплексу

Позиція та функція у САК	Тип пристрою (Модель)	Замовний артикул (MLFB) / Специфікація	Опис, інтеграція та інженерне обґрунтування вибору
Центральний процесор	CPU 1515F-2 PN	6ES7515-2FM02-0AB0	Робоча пам'ять: 750 КБ (код) / 3 МБ (дані). Швидкодія: 30 нс (бітові операції), 192 нс (рухома кома). Апаратна підтримка Safety Integrated (SIL 3). Інтерфейси: PROFINET IRT, PROFINET RT.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Закінчення таблиці 4.1

Позиція та функція у САК	Тип пристрою (Модель)	Замовний артикул (MLFB) / Специфікація	Опис, інтеграція та інженерне обґрунтування вибору
Витратомір сировини	Micro Motion ELITE	Поз. 4а (Коріолісовий сенсор CMF)	Пряме масове вимірювання потоку нафтової суміші. Забезпечує високу точність незалежно від зміни динамічної в'язкості продукту.
Регулюючі клапани	Samson Type 3241	Поз. 2в, 3в (з приводом Type 3271)	Прохідні регулюючі клапани з електропневматичними цифровими позиціонерами. При зникненні живлення автоматично переходять у безпечний Fail-Safe стан.

4.2 Розробка програмного забезпечення регуляторів та алгоритмів керування

Програмна реалізація системи керування базується на використанні стандартних технологічних об'єктів (Technology Objects) середовища TIA Portal, а саме PID_Compact та PID_Temp. Оскільки об'єкт характеризується багатовимірною природою, нелінійними теплофізичними властивостями та значним транспортним запізненням, у роботі застосовано дворівневу каскадну архітектуру регулювання.

4.2.1 Організаційні блоки реального часу та математична детермінованість

Фундаментальною вимогою до мікропроцесорного керування є забезпечення суворої детермінованості обчислень у часі. Викликати ПІД-регулятор у стандартному основному циклі (OB1) недопустимо, оскільки час

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

цього циклу постійно змінюється (Scan Time). Це створює джитер (jitter) і порушує стабільність періоду квантування. Рівняння ПІД-регулятора в дискретній формі має вигляд:

$$u_k = K_p e_k + K_i \sum_{j=0}^k e_j T_s + \frac{K_d}{T_s} (e_k - e_{k-1}),$$

де u_k — вихідний керуючий вплив;

e_k та e_{k-1} — поточна та попередня похибки;

K_p , K_i , K_d — коефіцієнти складових;

T_s — період квантування.

Щоб рекурсивний алгоритм працював абсолютно детерміновано, виклик технологічних об'єктів жорстко прив'язується до організаційного блоку циклічного переривання ОВ30. Враховуючи велику інерційність скребкового кристалізатора, період квантування налаштовано на рівні 100 мс.

4.2.2 Архітектура каскадного зв'язку та захист від інтегрального насичення

У TIA Portal каскадний зв'язок між регуляторами налаштовується через відповідні конфігураційні інтерфейси. Для головного регулятора температури (Master) активується параметр `Config.Cascade.IsMaster = TRUE`. Відповідно, для підпорядкованого регулятора тиску (Slave) задається `Config.Cascade.IsSlave = TRUE`. Після цього вихідний сигнал головного регулятора автоматично масштабується і подається на вхід завдання підпорядкованого контуру (`Slave_PID.Setpoint`).

Функціонально-структурна схема розробленого двоконтурного каскадного контуру регулювання параметрів кристалізатора наведена на рисунку 4.1.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сигнал додатково пропускається через цифровий фільтр першого порядку (РТ1), який реалізовано за допомогою методу зворотної різниці Ейлера:

$$y_n = y_{n-1} + \frac{T_s}{T_f}(x_n - y_{n-1}), \quad (4.1)$$

де y_n та y_{n-1} — відфільтровані значення;

x_n — вхідне значення;

T_f — стала часу фільтра.

Таблиця 4.3 — Інтерфейси технологічних об'єктів

Пін блоку	Формат	Призначення
Input_PER	INT	Пряме зчитування 4-20 мА з аналогового модуля (0...27648).
Setpoint	REAL	Цільове задання параметра для підтримки термодинамічної рівноваги.
Output_PER	INT	Вихід на позиціонер клапана Samson 3241 (струм 4-20 мА).
ManualValue	REAL	Значення для примусового ручного керування клапаном.

4.2.4 Алгоритмічна ідентифікація об'єкта (PID Tuning)

Налаштування та оптимізація параметрів ПІД-регулятора проводиться у два етапи за допомогою стандартних інструментів. На першому етапі виконується попереднє налаштування (Pretuning). Система аналізує криву розгону об'єкта (Step response), щоб визначити його транспортне запізнення (L) та еквівалентну сталу часу (T). На другому етапі проводиться точне налаштування (Fine tuning), під час якого генеруються релейні автоколивання безпосередньо в робочій точці. Це дозволяє знайти критичний період (P_{cr}) та критичне підсилення (K_{cr}). Після автоматичного розрахунку оптимальних коефіцієнтів K_p , T_i та T_d , контролер виконує безударне перемикання (bumpless transfer) контуру в нормальний автоматичний режим роботи.

4.3 Розробка людино-машинного інтерфейсу (НМІ) системи керування

Створення людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ) для автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора-технолога є важливим етапом проектування. Головна мета цього інтерфейсу — забезпечити зручний моніторинг, швидку діагностику та надійне керування процесом депарафінізації олів у скребковому кристалізаторі. Як програмну платформу для побудови верхнього рівня було обрано пакет SCADA WinCC, який входить до складу інженерного середовища TIA Portal V17.

4.3.1 Ієрархічна структура та концепція побудови екранів оператора

Проект ЛМІ розроблявся з урахуванням базових принципів ергономіки. Навігація між вікнами зроблена максимально простою і послідовною, щоб не перевантажувати оператора зайвою інформацією. Структурно графічний екран АРМ поділено на три основні зони:

- Верхня панель (Area Overview). Тут відображається назва відкритого екрана, системний час, індикатори стану зв'язку з ПЛК за протоколом PROFINET, а також панель активних критичних аварій, які ще не були підтверджені.
- Центральна робоча область. Це головна динамічна зона, де безпосередньо виводяться технологічні екрани або графіки, залежно від того, що вибрав користувач у меню.
- Нижня панель (Navigation Bar). На ній розміщені функціональні кнопки для швидкого перемикання між основними вікнами програми.

Сама ієрархія інтерфейсу складається з чотирьох базових екранів:

1. Головне вікно (Мнемосхема кристалізатора): інтерактивна графічна схема апарату, на якій у реальному часі відображаються всі технологічні параметри та стани виконавчих механізмів.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконавчі механізми (клапани Samson 3241 з електропневматичними позиціонерами) налаштовані на три колірні стани: зелений (клапан працює в режимі автоматичного регулювання), сірий (повністю закритий) і миготливий червоний (сталася аварія позиціонера або обрив лінії 4-20 мА). Якщо натиснути на зображення клапана, відкривається контекстне вікно. У ньому оператор може перевести керування в ручний режим (Manual) і самостійно задати відсоток відкриття засувки від 0 до 100%.

Візуальне відображення розробленої головної мнемосхеми з інтегрованими цифровими полями вводу-виводу (IO Fields), аналоговими шкалами та графічними образами виконавчих механізмів наведено на рисунку 4.2.

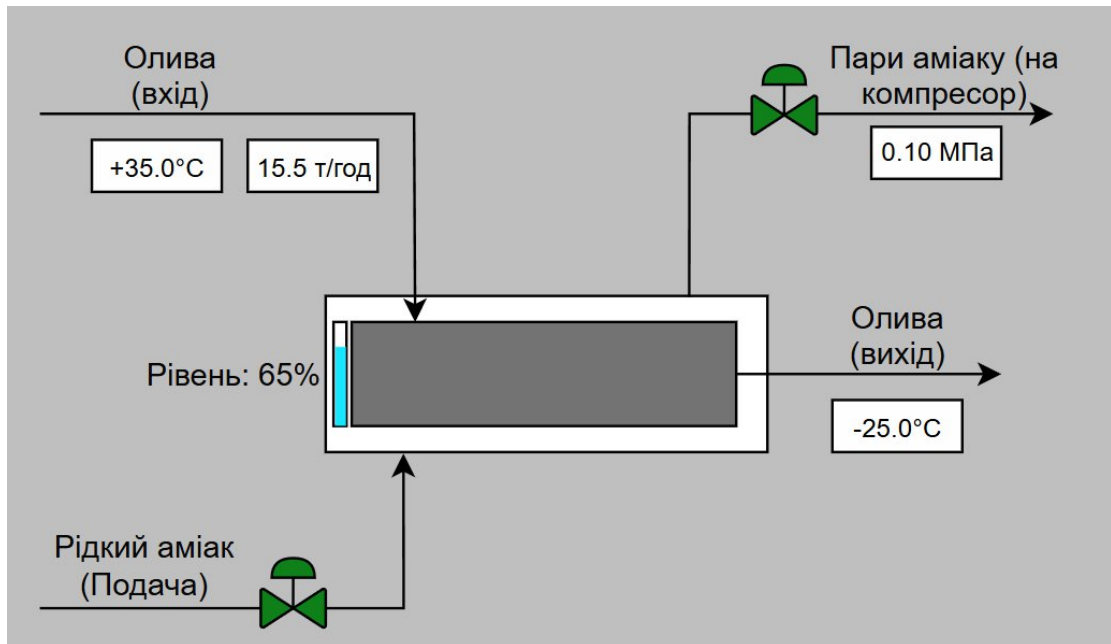


Рисунок 4.2 — Проектний ескіз головної мнемосхеми кристалізатора для SCADA-системи

4.3.3 Система аварійної сигналізації (Alarm Logging) та архівування параметрів (Tag Logging)

У системі SCADA WinCC налаштовано модуль сигналізації, який детектує події та записує їх у базу даних SQL. Усі повідомлення розділені на два основні класи:

						БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			65

1. Критичні аварії (клас "Errors", червоний колір): це ситуації, що становлять загрозу для обладнання або безпеки персоналу. При їх виникненні вмикається звукове сповіщення і автоматично спрацьовують алгоритми протиаварійного захисту (ПАЗ). До цього переліку віднесено: критично високий рівень аміаку ($L_{ам} > Max$), заклинювання скребкового вала (за даними активної потужності від SIMOCODE pro V) та падіння тиску повітря у пневмоприводах клапанів Samson. Такі аварії повністю блокують роботу системи. Вона не перезапуститься, поки першопричину не усунуть фізично, а оператор вручну не натисне кнопку «Квітувати» (Acknowledge).
2. Попереджувальні повідомлення (клас "Warnings", жовтий колір): означають, що технологічний процес відхилився від оптимальних значень. Наприклад, якщо температура оливи на виході ($T_{ол}$) змінилася більше ніж на ± 2 °C від заданої. Ці події не зупиняють процес, а лише інформують оператора про необхідність стабілізувати режим.

Графічний інтерфейс підсистеми детектування та реєстрації аварійних подій (Alarm View) хронологічного журналу поточних тривог у нормальному та аварійному режимах роботи обладнання подано на рисунку 4.3.

Дата	Час	Клас	Стан	Текст аварійного повідомлення
13.06.2026	10:45:12	Errors	C	Критичне перевищення рівня аміаку в сорочці кристалізатора ($L_{ам} > Max$)
13.06.2026	10:42:05	Warnings	C/A	Відхилення температури оливи на виході $T_{ол}$ від заданої межі (+2.3 °C)
13.06.2026	10:00:00	System	A	Зв'язок із ПЛК CPU 1515F-2 PN встановлено успішно. Мережа PROFINET активна

Рисунок 4.3 — Проектний ескіз вікна аварійної сигналізації (Alarm Logging)

Для збереження історії процесу використовується підсистема Tag Logging. Вона безперервно записує зміну технологічних параметрів у вигляді трендів. Оскільки контури керування мають різну інерційність, для них задано диференційовані цикли архівації даних, які зведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 — Регламент архівації технологічних змінних у системі Tag

Logging

Назва технологічного тега	Фізична величина	Джерело даних (Датчик)	Цикл архівації	Тип архівації
Cryo_Temp_Out	Температура оливи на виході	WIKA TR10	5 секунд	За періодом (інерційний параметр)
Ammonia_Pressure	Тиск кипіння аміаку	Yokogawa EJA110E	1 секунда	За періодом (динамічний параметр)
Ammonia_Level	Рівень аміаку в сорочці	VEGAFLEX 81	2 секунди	За періодом
Oil_Mass_Flow	Масова витрата суміші	Micro Motion ELITE	2 секунди	За періодом
Motor_Power_Active	Активна потужність двигуна	SIMOCODE pro V	1 секунда	При зміні на $\pm 2\%$ або за періодом

Історичні тренди зберігаються в базі даних SCADA протягом 30 діб, що дозволяє інженерному персоналу проводити ретроспективний аналіз роботи кристалізатора та оптимізувати параметри каскадного регулювання.

4.4 Реалізація алгоритмів протиаварійного захисту (ПАЗ)

4.4.1 Фундаментальна концепція функціональної безпеки на базі Fail-Safe контролерів

Забезпечення безперебійної та безаварійної експлуатації скребкового аміачного кристалізатора вимагає впровадження високонадійної системи протиаварійного захисту (ПАЗ). Цей об'єкт класифікується як об'єкт підвищеної небезпеки через використання токсичного та вибухонебезпечного холодоагенту (безводного аміаку), а також легкозаймистого бензинового розчинника. Відповідно до сучасних вимог промислової безпеки та міжнародного стандарту IEC 61508, система керування повинна забезпечувати рівень повноти безпеки SIL 3 (Safety Integrity Level).

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Сучасна парадигма автоматизації, що застосовується у даному проєкті, базується на технології Safety Integrated. Вона передбачає об'єднання стандартної логіки керування (BPCS) та логіки протиаварійного захисту (SIS) в єдиному апаратному базисі — Fail-Safe контролері. Стандартна логіка керування орієнтована на оптимізацію процесу та стабілізацію параметрів, вона є гнучкою і толерантною до короткочасних відхилень. Натомість логіка ПАЗ має єдину мету — гарантоване і миттєве переведення технологічного об'єкта в безпечний стан при виникненні загрози.

Апаратно-програмним ядром проєктованої системи обрано програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1500 моделі CPU 1515F-2 PN (замовний номер 6ES7515-2FM02-0AB0). Наявність літери "F" у маркуванні свідчить про його сертифікацію для виконання завдань функціональної безпеки.

Для досягнення рівня SIL 3 інженерне середовище TIA Portal V17 застосовує принцип 1oo2D (One out of Two with Diagnostics) з використанням логічного та часового диверсифікування. Під час компіляції алгоритмів ПАЗ автоматично генерується два екземпляри коду: основний та інвертований. Під час робочого циклу мікропроцесор обчислює обидва алгоритми з часовим зсувом і безперервно порівнює результати. Якщо процесор фіксує найменшу розбіжність, система негайно розцінює це як фатальний апаратний збій, зупиняє роботу (перехід у стан STOP) та знеструмлює всі Fail-Safe модулі, переводячи кристалізатор у безпечний стан.

Таблиця 4.5 — Порівняльний аналіз архітектури стандартної логіки та логіки безпеки

Характеристика архітектури	Стандартна логіка керування (BPCS)	Логіка протиаварійного захисту (ПАЗ / SIS)
Цільова функція	Оптимізація процесу кристалізації, стабілізація термодинамічних параметрів.	Запобігання гідроударам, пожежам, руйнуванню обладнання.

Затримка або втрата	Перевантаження мережі, обрив кабелю.	Апаратний таймер F-Watchdog. Суворий ліміт часу очікування.	Миттєва пасивація (знеструмлення) пристрою при тайм-ауті.
Хибна адресація (Masquerading)	Збій IP/MAC адресації, підміна пакетів.	Використання унікальних адрес як початкового значення (seed) для CRC2.	Розбіжність контрольної суми, блокування системи.

Останнім ешеленом захисту є таймер F-Watchdog. Якщо через фізичний обрив кабелю ПЛК перестає отримувати телеграми від модуля вводу-виводу, таймер переповнюється і автоматично ініціює переведення системи у безпечний стан.

4.4.3 Логіка захисту від переповнення сорочки аміаком:

Гідродинаміка та взаємодія з клапанами Samson

Однією з найкритичніших аварійних ситуацій є порушення балансу в кристалізаторі, що призводить до неконтрольованого зростання рівня рідкого аміаку. Досягнення рівнем уставки Мах створює загрозу екстреного закиду не випаруваної рідини в компресор. Потрапляння нестисливого рідкого аміаку в робочі циліндри компресора спричиняє руйнівний гідроудар та розгерметизацію системи.

Первинним перетворювачем у контурі захисту виступає радарний рівнемір VEGAFLEX 81. Коли логіка ПАЗ фіксує перевищення рівня, система ініціює миттєве блокування подачі холодоагенту. Виконавчим механізмом виступає клапан Samson Type 3241 з пневмоприводом. Алгоритм безпеки діє шляхом апаратного розриву ланцюга живлення на модулі аналогового виводу: сигнал падає з робочого діапазону (4-20 мА) до 0 мА.

При зникненні живлення струмо-пневматичний перетворювач позиціонера знеструмлюється і відкриває канал екстреного скидання повітря з привода в

										Арк.
										71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП-03.00.000 ПЗ					

атмосферу. Як тільки тиск повітря падає, масивні сталеві пружини привода стрімко вивільняють кінетичну енергію, вдавлюючи плунжер клапана в сідло. Це гарантує 100% пасивну надійність захисту і повне перекриття потоку аміаку менше ніж за 1 секунду навіть у випадку повного знеструмлення заводу.

4.4.4 Логіка захисту від заклинювання скребкового механізму на базі обчислення активної потужності

Другою критичною точкою ПАЗ є центральний вал зі скребковими механізмами. Внаслідок надмірного охолодження всередині труб може утворитися масивна парафінова кірка, що створює колосальний опір для скребків і загрожує зламом вала або згорянням двигуна.

Традиційні системи захисту, які спираються на моніторинг лише сили струму статора, є неефективними. При низьких навантаженнях струм маскується великою реактивною складовою намагнічування. Тому в проєкті застосовано інтелектуальне реле керування двигуном Siemens SIMOCODE pro V PN. Пристрій у режимі реального часу обчислює активну споживану потужність двигуна, яка розраховується за формулою:

$$P_{\text{акт}} = \sqrt{3} * U * I * \cos\varphi, \quad (4.2)$$

де U — лінійна напруга;

I — лінійний струм статора;

$\cos(\varphi)$ — коефіцієнт потужності.

Дані про активну потужність циклічно передаються у Fail-Safe контролер. У логіці ПАЗ реалізована двоступенева реакція:

1. Етап попередження: При досягненні межі попередження система автоматично зменшує подачу аміаку. Це дозволяє пом'якшити парафінову суспензію теплим потоком сировини і знизити навантаження на скребки без зупинки процесу.
2. Етап аварійного захисту: Якщо потужність продовжує зростати і досягає критичної межі блокування (загроза зрізання шпонок), алгоритм ПАЗ

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно зі стандартом ІЕС 61508, автоматичний перезапуск після спрацьовування ПАЗ категорично заборонений, оскільки це може спричинити повторні аварії. Тому в системі впроваджено жорстке блокування повторного пуску (Interlocking). Відновлення роботи вимагає багатоетапної процедури квітування:

1. Фізична стабілізація: Усунення першопричини аварії персоналом.
2. Захищений інтерфейс: Оператор відкриває захищене вікно на SCADA-системі.
3. Двоетапна алгоритмічна верифікація: Для захисту від мережевих збоїв блок АСК_ОР у ПЛК приймає квітування лише за умови дотримання специфічної часової послідовності сигналів від оператора.
4. Глобальна реінтеграція: Інструкція АСК_GL скидає статуси помилок та відновлює живлення безпечних модулів.
5. Відновлення регулювання: Позиціонер клапана отримує живлення і система повертається у нормальний технологічний режим роботи.

Узагальнену логіку роботи системи безпеки, що включає моніторинг активної потужності приводу та контроль рівня рідкого аміаку із подальшим алгоритмом квітування, подано у вигляді структурної блок-схеми. Блок-схему розробленого алгоритму протиаварійного захисту (ПАЗ) наведено на рисунку 4.4.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

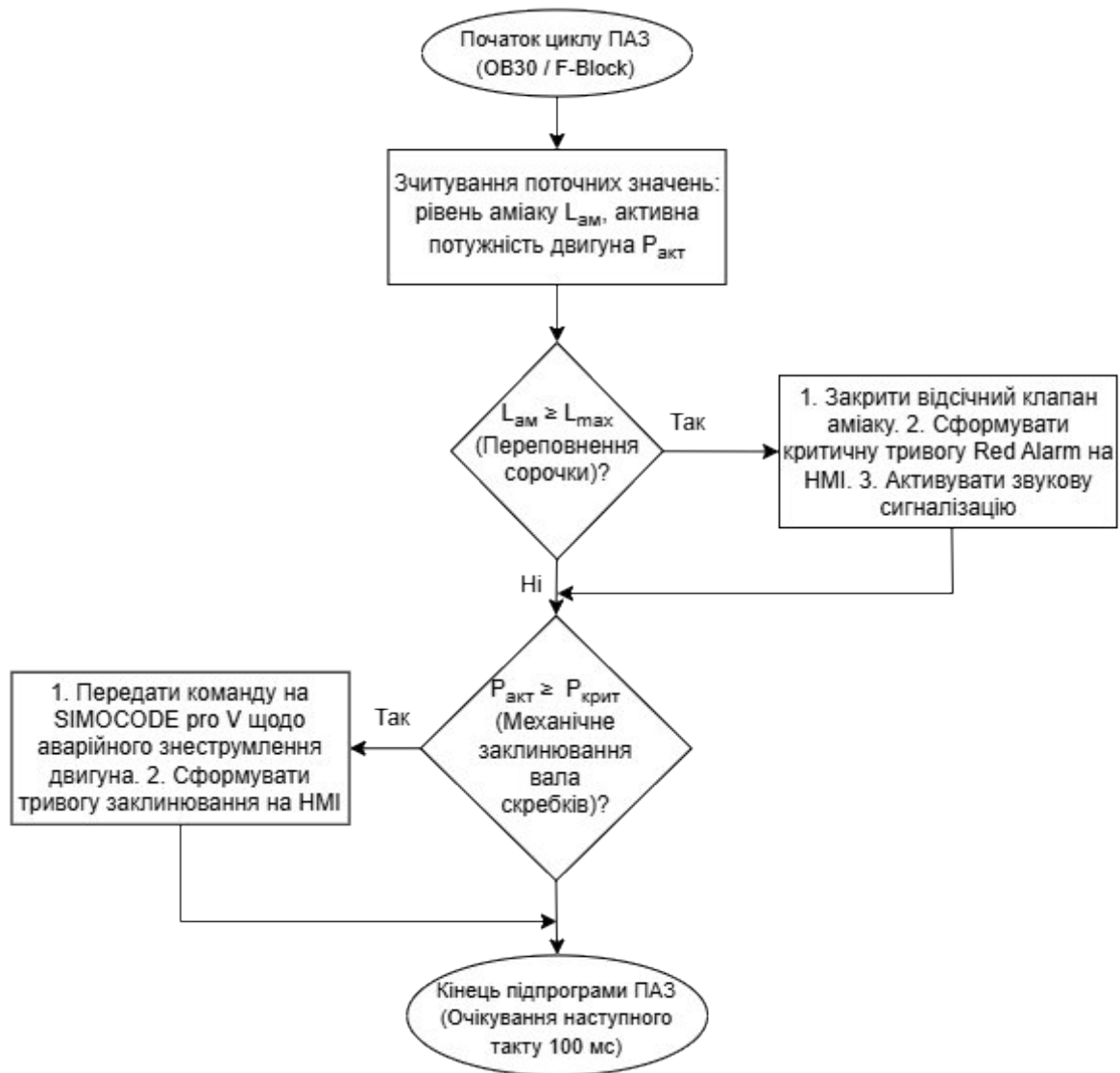


Рисунок 4.4 — Блок-схема алгоритму протиаварійного захисту кристалізатора

Висновки до розділу

Виконано повну програмну реалізацію розробленої системи в інтегрованому середовищі TIA Portal V17. Синтезовано алгоритми каскадного ПД-регулювання із захистом від інтегрального насичення, а також створено ергономічний людино-машинний інтерфейс (HMI) у системі SCADA WinCC для оперативного моніторингу процесу. Особливу увагу приділено розробці логіки протиаварійного захисту рівня SIL 3 з використанням протоколу PROFI-safe та модуля SIMOCODE pro V, що гарантує безпечне блокування установки у разі переповнення апарата аміаком або механічного заклинювання скребкового вала.

											Арк.
											75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Сєверілов П. А. Теорія автоматичного керування : підручник / П. А. Сєверілов, М. Г. Попович. — Київ : Либідь, 2019. — 544 с.
2. Пупена О. М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навчальний посібник / О. М. Пупена, І. В. Ельперін, Ю. М. Цапко. — Київ : Ліра-К, 2018. — 552 с.
3. Брагинський О. Б. Технологія переробки нафти і газу : навчальний посібник / О. Б. Брагинський. — Київ : Центр навчальної літератури, 2017. — 320 с.
4. SIMATIC S7-1500, ET 200MP Automation system : System Manual / Siemens AG. — Nuremberg : Siemens AG, 2021. — 312 p.
5. SIMATIC Safety - Configuring and Programming : Programming and Operating Manual / Siemens AG. — Nuremberg : Siemens AG, 2021. — 420 p.
6. SIMOCODE pro PROFIBUS / PROFINET / EtherNet/IP : System Manual / Siemens AG. — Nuremberg : Siemens AG, 2020. — 280 p.
7. Pneumatic Control Valves Type 3241 : Mounting and Operating Instructions / Samson AG. — Frankfurt am Main : Samson AG, 2022. — 54 p.
8. EJA110E Differential Pressure Transmitter : User's Manual / Yokogawa Electric Corporation. — Tokyo : Yokogawa Electric Corporation, 2021. — 112 p.
9. Resistance thermometer TR10 : Operating instructions / WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG. — Klingenberg : WIKA, 2022. — 36 p.
10. Micro Motion ELITE Coriolis Flow and Density Meters : Product Data Sheet / Emerson Electric Co. — Boulder : Emerson, 2021. — 48 p.
11. VEGAFLEX 81 - Guided wave radar : Operating Instructions / VEGA Grieshaber KG. — Schiltach : VEGA, 2020. — 72 p.
12. ДСТУ ІЕС 61508:2010. Функціональна безпека електричних/електронних/програмованих електронних систем, пов'язаних з безпекою. — Київ : Держспоживстандарт України, 2012. — 20 с.
13. PROFIsafe – System Description. Technology and Application / PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. — Karlsruhe : PNO, 2019. — 50 p.

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

14. Сміт С. Цифрова обробка сигналів : практичний посібник для інженерів і науковців / С. Сміт. — Київ : Техніка, 2016. — 608 с.
15. Довідник з автоматизації технологічних процесів у нафтогазовій промисловості / за ред. В. С. Борина. — Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2020. — 215 с.
16. Berger H. Automating with SIMATIC S7-1500 : Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional / H. Berger. — Erlangen : Publicis Publishing, 2017. — 855 p.
17. Офіційний сайт компанії Siemens [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.siemens.com> (дата звернення: 10.06.2026).
18. Офіційний сайт компанії WİKA [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.wika.com> (дата звернення: 10.06.2026).

					БР.АКП-03.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Функціональна схема автоматизації аміачного холодильника-кристалізатора

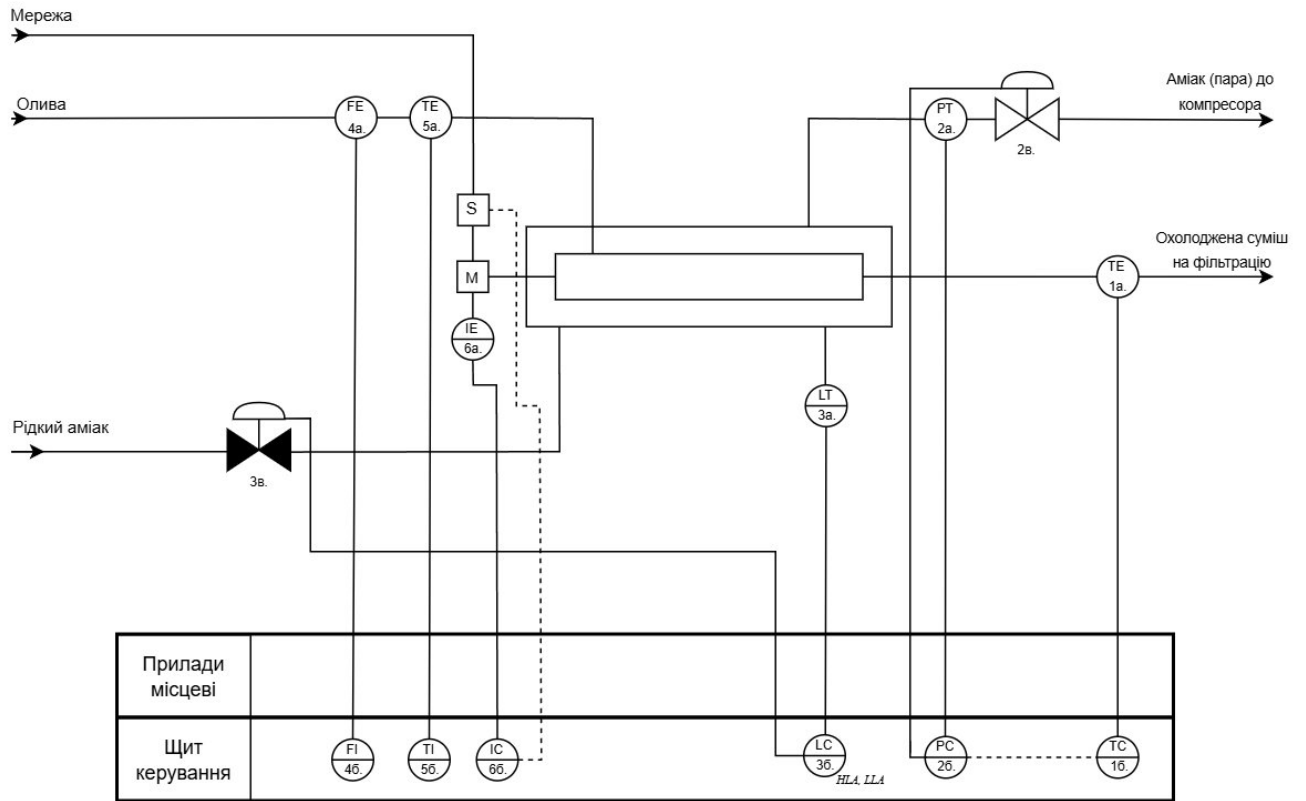


Рисунок А.1 – Функціональна схема автоматизації аміачного холодильника-кристалізатора

ДОДАТОК Б

Структурна схема каскадної системи автоматичного регулювання

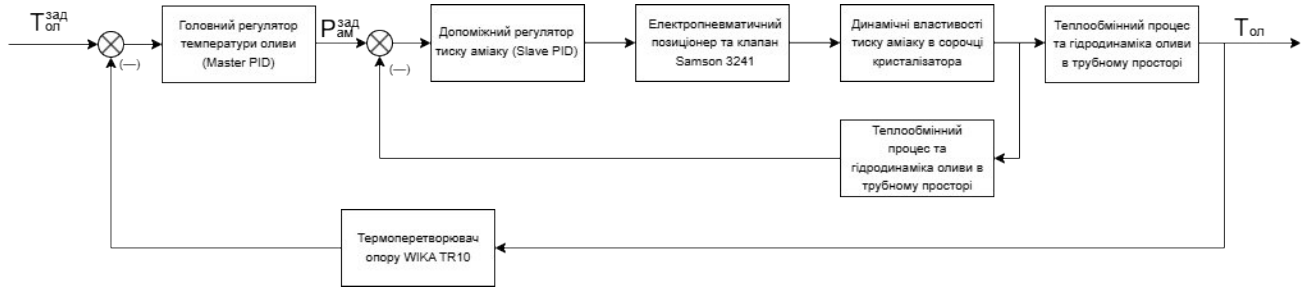


Рисунок Б.1 – Структурна схема каскадної системи автоматичного регулювання

ДОДАТОК В

Проектний ескіз головної мнемосхеми SCADA-системи

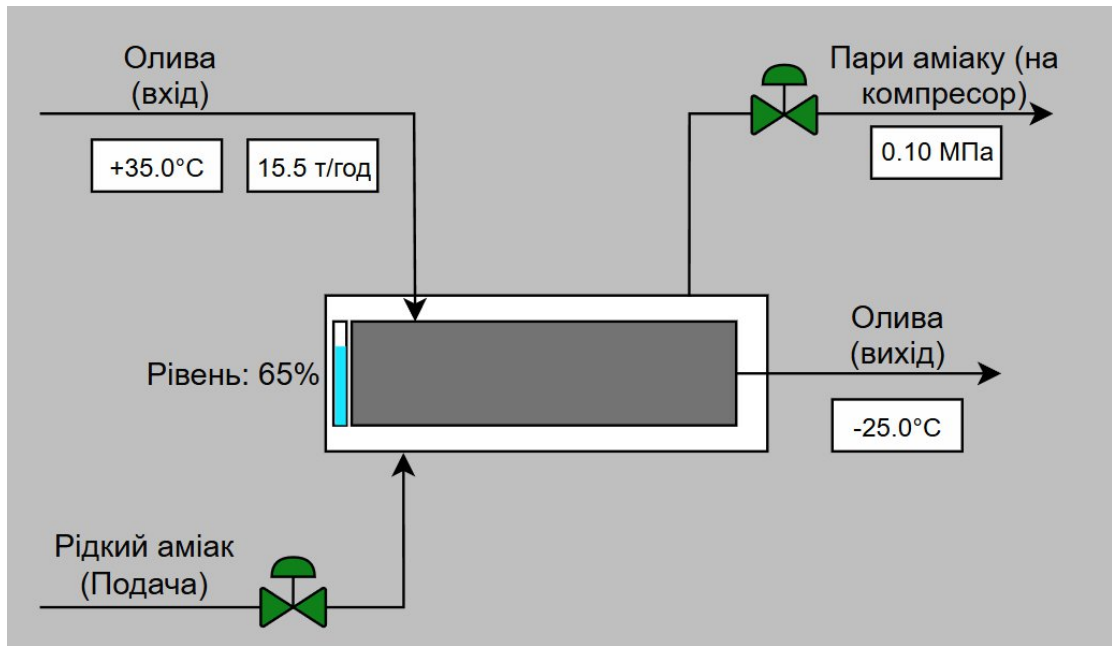


Рисунок В.1 – Проектний ескіз головної мнемосхеми SCADA-системи

ДОДАТОК Г

Блок-схема алгоритму протиаварійного захисту (ПАЗ)

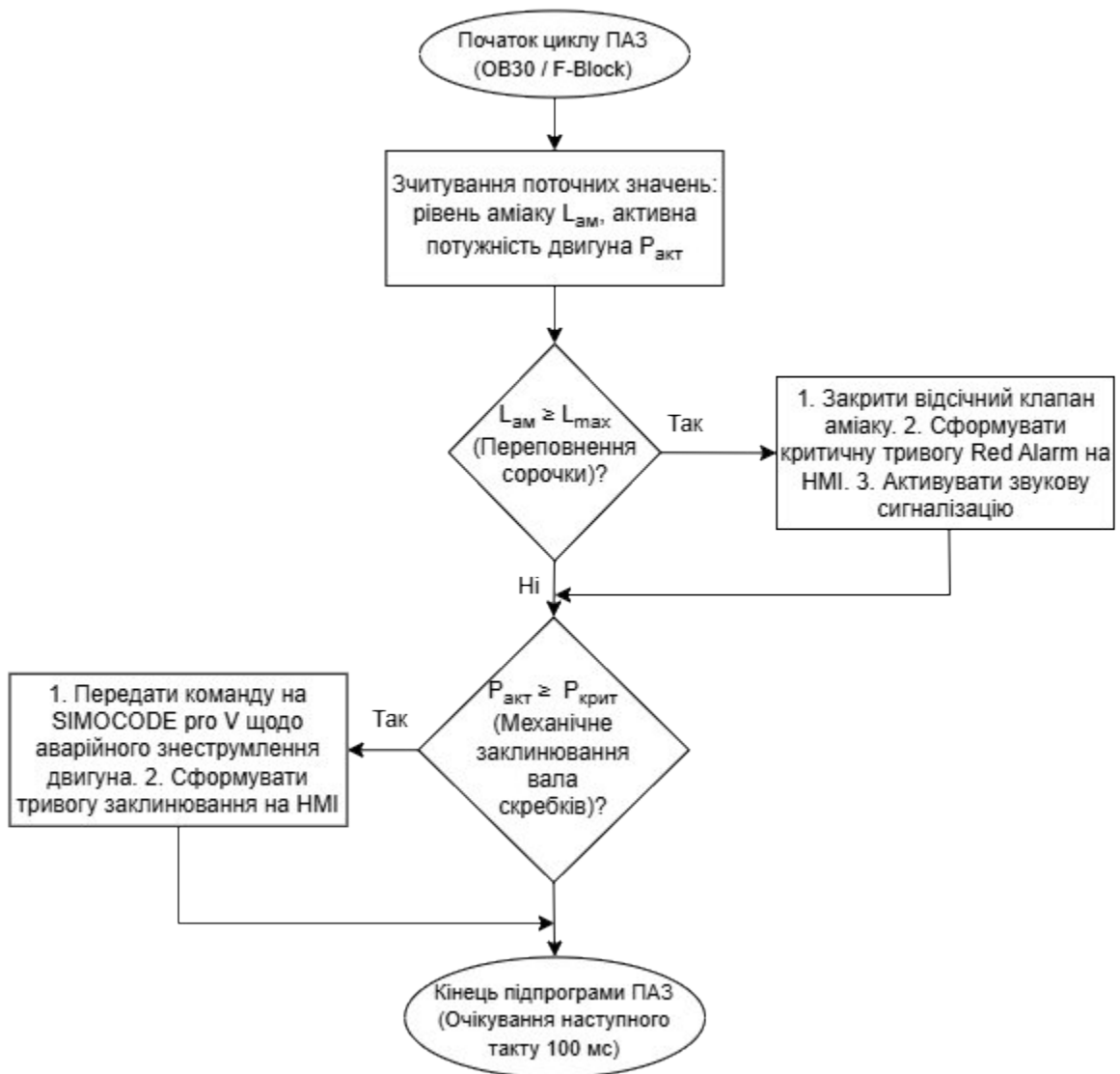


Рисунок Г.1 – Блок-схема алгоритму протиаварійного захисту (ПАЗ)