

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики

Кафедра автоматизації енергетичних процесів

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ВОЛОЩУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: автоматизація системи керування автоклавом

Виконав:

студент IV курсу, групи ТА-11

Романюк Святослав Миколайович

Керівник:

доцент кафедри АЕП,

к.т.н., доцент Баган Тарас Григорович

Консультант з охорони праці:

к.т.н., доцент Каштанов Сергій Федорович

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики
Кафедра автоматизації енергетичних процесів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Володимир ВОЛОЩУК

«___»_____20__р.

ЗАВДАННЯ

На дипломний проєкт студенту

Романюк Святослав Миколайович

1. Тема проєкту «Автоматизація системи керування автоклавом», керівник проєкту Баган Тарас Григорович, доцент, доцент к.т.н., затверджені наказом по університету від «02» червня 2025 р. №1875-с
2. Термін подання студентом проєкту «10» червня 2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту: літературні джерела, інформація, зібрана під час проходження виробничої практики.
4. Зміст пояснювальної записки: Проєктування АСУТП, Інженерний розрахунок САР, Опис графічної частини, Програмування ПТКЗА, Імітаційне моделювання АТК, Охорона праці, Техніко-економічний розрахунок, Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу: 1. Функціональна схема автоматизації. 2. Схема структурна ПТК. 3. Схема електрична принципова. 4. Креслення загального виду щита. 5. Схема зовнішніх з'єднань. 6. Специфікація обладнання.

6. Консультант розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Каштанов С. Ф., доцент, к.т.н.		

7. Дата видачі завдання «14» квітня 2025 р.

Календарний план

№	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Постановка задачі автоматизації ТОУ	19.04.2025	
2	Функціональна схема автоматизації.	12.05.2025	
3	Схема електрична принципова. Схема структурна ПТК	19.05.2025	
4	Креслення загального виду щита	22.05.2025	
5	Схема зовнішніх проводок	24.05.2025	
6	Специфікація обладнання	28.05.2025	
7	Опис об'єкта автоматизації	31.05.2025	
8	Імітаційне моделювання АТК	03.06.2025	
9	Охорона праці	03.06.2025	
10	Техніко-економічний розрахунок	05.06.2025	
11	Нормоконтроль	10.06.2025	
12	Передзахист ДП	14.06.2025	
13	Захист ДП	20.06.2025	

Студент

Святослав РОМАНЮК

Керівник

Тарас БАГАН

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячено розробці та впровадженню автоматизованої системи керування (АСК) для автоклава, що використовується у процесі шотування продукції. Основною метою дослідження є підвищення ефективності, надійності та безпечності процесу стерилізації шляхом впровадження сучасних засобів автоматизації та програмного забезпечення.

У роботі досліджено структуру технологічного процесу автоклава, здійснено вибір технічних засобів автоматизації, розроблено функціональну та принципову електричну схеми, а також побудовано програмно-технічний комплекс на основі ПЛК Phoenix Contact та SCADA-системи WebStudio.

Практичне значення роботи полягає у створенні надійної системи керування, яка забезпечує контроль основних параметрів процесу – температури, тиску, рівня та витрати води. Реалізовано ПІД-регулювання, аварійний захист та дистанційний моніторинг, що дозволяє зменшити вплив людського фактора та підвищити якість готової продукції.

Результати дослідження можуть бути використані при модернізації існуючих систем стерилізації на підприємствах харчової та фармацевтичної промисловості, а також при проєктуванні нових установок з підвищеними вимогами до санітарно-гігієнічної безпеки.

Завершальним етапом проєкту став техніко-економічний розрахунок, який підтвердив доцільність впровадження автоматизованої системи з погляду економічної ефективності.

Ключові слова: автоматизація, автоклав, ПЛК, SCADA, проєктування, ПІД-регулювання.

ABSTRACT

The bachelor's thesis is dedicated to the development and implementation of an automated control system (ACS) for an autoclave used in the process of product sterilization (shotting). The main goal of the research is to improve the efficiency, reliability, and safety of the sterilization process through the use of modern automation tools and software.

The work investigates the structure of the autoclave's technological process, selects appropriate automation hardware, develops both the functional and electrical schematic diagrams, and constructs a software and hardware complex based on a Phoenix Contact PLC and the WebStudio SCADA system.

The practical significance of the project lies in the creation of a reliable control system that ensures the monitoring and regulation of key process parameters—temperature, pressure, water level, and flow rate. PID control, emergency protection, and remote monitoring are implemented, allowing for reduced human factor influence and improved final product quality.

The results of the research can be applied in the modernization of existing sterilization systems at enterprises in the food and pharmaceutical industries, as well as in the design of new installations with increased sanitary and hygienic safety requirements.

The final stage of the project included a techno-economic assessment, which confirmed the feasibility of implementing the automated control system from an economic efficiency standpoint.

Keywords: automation, autoclave, PLC, SCADA, design, PID contro

Зміст

РОЗДІЛ 1 ПРОЄКТУВАННЯ АСУТП.....	2
1.1 Характеристика технологічного об'єкту управління	2
1.2. Вибір та обґрунтування структури АСУТП ТОВ	5
1.2.1 Огляд існуючих систем	5
1.2.2 Опис прийнятої структури АСК.....	6
1.3. Технологічні параметри АСУТП ТОВ	6
1.3.1. Технологічний контроль	6
1.3.2. Автоматичне регулювання та керування	7
1.3.3. Технологічна сигналізація	7
1.3.4. Технологічний захист та блокування.....	8
1.3.5. Живлення приладів та засобів автоматизації.....	8
1.4 Функції АСУТП	8
1.4.1 Управляючі функції:.....	8
1.4.2 Захисні функції:	9
1.4.3 Інформаційні функції:	9
1.5. Схема автоматизації функціональна.....	10
1.6. Схема структурна програмно-технічного комплексу	11
1.7 Перелік і аналіз джерел техніко-економічної ефективності АТК ТОВ	12
РОЗДІЛ 2 ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК САР	14
2.1 Інженерний розрахунок вимірювальних каналів САР.....	14
2.1.1 Перелік вимірювальних каналів.....	14
2.1.2 Схеми структурні вимірювальних каналів.....	15
2.1.3 Особливості електричних підключень давачів вимірювальних каналів	19

					ТА-11388.013.001.АТХ.П		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Романюк С.М				Автоматизація системи керування автоклавом	Лит.	Лист
Перевірив	Баган Т.Г.						Листов
							6
							94
Затвердив	Волощук В.А				КПІ ім.І.Сікорського, НН ІАТЕ, гр. ТА-11		

2.1.4	Монтаж технічних засобів вимірювальних каналів	20
2.1.5	Захист технічних засобів вимірювальних каналів від перешкод.....	20
2.1.6	Схеми структурної надійності вимірювальних каналів.....	21
2.1.7	Метрологічний розрахунок вимірювальних каналів	26
2.1.8	Розрахунок надійності вимірювальних каналів.....	28
2.1.9	Функції первинної обробки даних вимірювання в ПЛК	30
2.1.10	Висновок щодо роботоздатності вимірювальних каналів САР	31
2.2	Інженерний розрахунок регулювально-виконавчих каналів САР.....	32
2.2.1	Перелік систем автоматичного регулювання	32
2.2.2	Функціональна і структурна схеми САР	32
2.2.3	Схема структурна регулювально-виконавчого каналу САР	35
2.2.4	Схема структурна програмно-технічних засобів САР.....	37
2.2.5	Схема структурна надійності реалізації управляючої функції САР	39
2.2.6	Розрахунок надійності реалізації управляючої функції САР.....	41
2.2.7	Ідентифікація об'єкта управління.....	43
2.2.8	Розрахунок регуляторів САР	46
2.2.9	Функціональне моделювання САР	54
2.2.10	Висновки щодо роботоздатності РВК САР	56
РОЗДІЛ 3 ОПИС ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЄКТУ		58
3.1	Схема функціональна автоматизації ТОУ	58
3.2	Схема структурна ПТК.....	58
3.3	Схема принципова електрична АСР	58
3.4	Креслення загального виду щита	60
3.5	Схема монтажна щита (таблиця з'єднань)	61
3.6	Схема зовнішніх з'єднань	62
3.7	Специфікація обладнання	63
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМУВАННЯ ПТКЗА		66
4.1	Програмування функціональності ПЛК	66

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Програмування функціональності SCADA-системи.....	67
РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АТК	70
5.1 Схема структури імітаційного моделювання АТК ТОВ	70
5.2 Функціональне моделювання ОУ в СКМ MatLab Simulink	71
5.3 Реалізація контролерної функціональності САР в софтПЛК CoDeSys	71
5.4 Реалізація супервізорної HMI-Standard функціональності в HMI/SCADA-системі WebStudio	71
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ	75
6.1 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного устаткування та засобів автоматизації	75
6.1.1 Аналіз небезпек	75
6.1.2 Технічні рішення та організаційні заходи.....	76
6.1.3 Електробезпека.....	77
6.2 Гігієна праці та виробнича санітарія.....	79
6.2.1 Мікроклімат робочої зони.....	79
6.2.2 Склад повітря робочої зони	79
6.2.3 Виробниче освітлення	79
6.2.4 Виробничий шум.....	80
6.2.5 Виробничі вібрації	80
6.2.6 Виробничі випромінювання	80
6.3 Пожежна безпека та профілактика.....	81
6.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	81
6.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту	81
Висновки до розділу	82
РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК	84
7.1 Джерела техніко-економічної ефективності	84
7.2 Капітальні витрати на впровадження АСУТП.....	84
7.3 Річна економія від автоматизації.....	84
7.4 Додаткові витрати на експлуатацію АСУТП	85

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.5 Річна економічна ефективність	85
7.6 Строк окупності капіталовкладень	85
7.7 Економічний ефект від автоматизації.....	85
Висновки до розділу	85
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 ПРОЄКТУВАННЯ АСУТП

1.1 Характеристика технологічного об'єкту управління

Автоклав є одним із ключових технологічних пристроїв у харчовій промисловості, а також у суміжних галузях, де необхідне дотримання стерильності та високого рівня санітарної безпеки. Це герметичний резервуар, призначений для шотування консервів із м'ясом, молочними виробами, овочами, фруктами та іншими продуктами, а також для стерилізації різноманітних матеріалів – від медичних інструментів до лабораторного посуду. Завдяки здатності працювати під високим тиском і при підвищених температурах, автоклав дозволяє ефективно знищувати патогенні мікроорганізми, які можуть викликати псування продуктів або загрожувати здоров'ю споживачів [2].

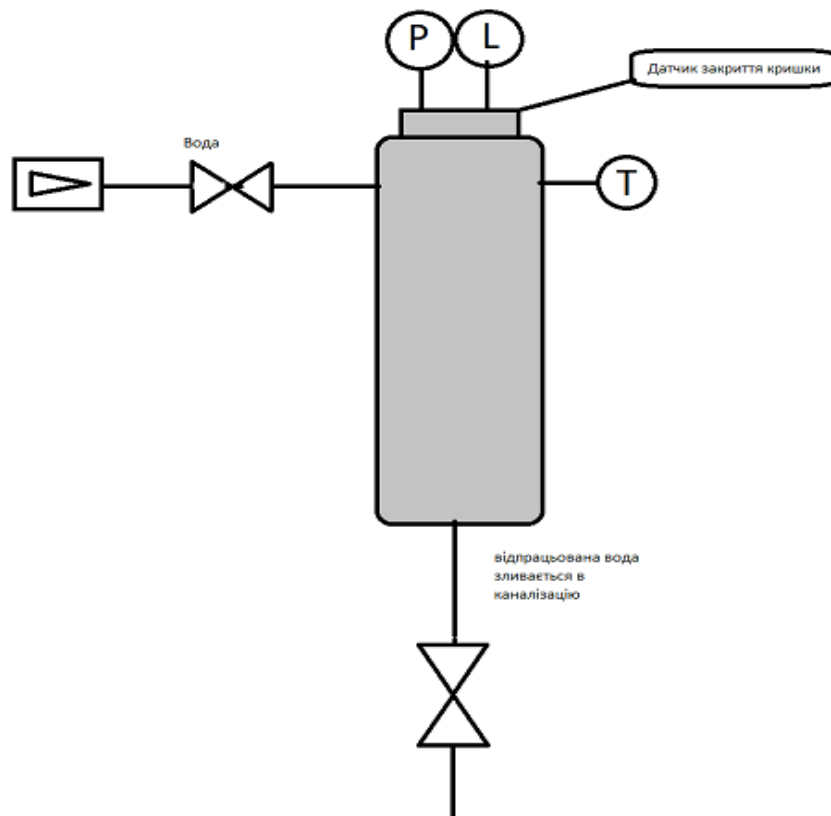


Рисунок 1.1 – Технологічна схема об'єкту управління

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принцип дії автоклава базується на циклічній роботі, яка включає етапи нагрівання, витримки та охолодження. У процесі роботи камера заповнюється водою або паром, що нагрівається до температури, яка перевищує точку кипіння води при нормальному тиску. Завдяки герметичності автоклава і підвищеному внутрішньому тиску температура може досягати 200 °С, що дозволяє проводити ефективну стерилізацію без ризику руйнування тари чи втрати герметичності. Система забезпечує підтримання стабільних параметрів упродовж усього циклу, що має критичне значення для якості готової продукції [3].

Шотування як процес є однією з форм стерилізаційної термічної обробки, яка відбувається під надлишковим тиском. Суть цього процесу полягає у нагріванні консервованого продукту до певної температури та витримці в такому стані впродовж часу, достатнього для повного знищення мікроорганізмів. Особливо важливо знищити термостійкі бактерії, наприклад, збудників ботулізму (*Clostridium botulinum*), які можуть виживати при звичайному кип'ятінні. Шотування забезпечує мікробіологічну безпеку продукту без застосування хімічних консервантів [2].

Крім забезпечення стерильності, шотування дозволяє зберегти високу якість продукту. Оскільки процес відбувається при вищій температурі, ніж кипіння, але за контрольованих умов, час обробки значно скорочується. Це позитивно впливає на збереження органолептичних властивостей – кольору, смаку, текстури – та дозволяє мінімізувати втрати вітамінів і біологічно активних речовин. У результаті споживач отримує не тільки безпечний, а й якісний продукт.

Залежно від типу продукції, режими шотування можуть суттєво відрізнятись. Для м'ясних консервів характерні високі температури обробки (до 125 °С) і підвищений тиск (до 2 бар), що необхідно для повного знезараження щільної білково-жирової маси. Такі продукти мають високу теплоємність, а проникнення тепла до центру банки потребує більш інтенсивного режиму обробки. Натомість, для молочних виробів обираються делікатніші режими з нижчою температурою і коротшим часом витримки, що пов'язано з чутливістю білків до термічної

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

денатурації. У випадку перегріву можуть спостерігатися зсідання, випадіння осаду, зміна консистенції або втрата товарного вигляду.

Цикл роботи автоклава починається з завантаження банок або іншої тари з продуктами у внутрішню камеру. Після герметичного закриття дверцят (люка) до камери подається вода, об'єм якої контролюється за допомогою датчика рівня. Після цього за допомогою компресора створюється необхідний тиск. Температура води підвищується за рахунок електронагрівальних елементів. Коли температура досягає заданого значення, починається етап витримки – стабільного утримання температурно-тискового режиму протягом визначеного часу. Це дозволяє рівномірно прогріти як зовнішню, так і внутрішню частину продукту [3].

Після завершення витримки розпочинається контрольоване охолодження. Важливо, щоб охолодження відбувалося поступово, інакше може виникнути температурний шок, що здатен спричинити тріщини або вибух тари. Коли температура знижується до безпечного рівня, вода зливається, тиск нормалізується, і автоклав відкривається для вивантаження готової продукції.

Основні технологічні параметри представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення технологічних параметрів системи

Параметр	Значення (похибка)
Тиск	0–10 бар ($\pm 0,1$ бар)
Температура	0–200 °C (± 1 °C)
Витрата води	$\pm 0,2$ л/хв
Рівень води	0–1,7 м ($\pm 1\%$)

Контури автоматичного регулювання

1. Контур регулювання температури

- Призначення: Підтримка заданої температури всередині автоклава.
- Алгоритм роботи: Датчик температури передає поточне значення до PLC, яке порівнюється з уставкою; якщо температура нижча – вмикається нагрівальний елемент, якщо перевищена – вимикається; у разі перегріву активується аварійне відключення.

2. Контур регулювання тиску

- **Призначення:** Контроль і регулювання тиску всередині автоклава.
- **Алгоритм роботи:** Датчик тиску відправляє сигнал до PLC, який порівнює значення з допустимим діапазоном; якщо тиск перевищує норму – відкривається клапан скиду, якщо в нормі – клапан залишається закритим.

3. Контур регулювання рівня води

- **Призначення:** Автоматична підтримка необхідного рівня води.
- **Алгоритм роботи:** Датчик рівня вимірює поточне значення та передає його на контролер; якщо рівень нижчий за норму – відкривається клапан подачі води, якщо рівень досяг необхідного значення – клапан закривається.

4. Контур регулювання витрати води

- **Призначення:** Регулювання витрати води під час охолодження.
- **Алгоритм роботи:** PLC отримує сигнал від витратоміра, аналізує значення та керує клапаном подачі води.

1.2. Вибір та обґрунтування структури АСУТП ТОУ

1.2.1 Огляд існуючих систем

Для регулювання температури в автоклаві можливе застосування кількох типових структур автоматичного керування:

1. **Одноконтурна система регулювання.** Найпростіша структура, в якій температура регулюється за зворотним зв'язком — сигнал від датчика температури надходить до регулятора, який формує керуючий вплив (включення/вимкнення нагріву). Переваги: простота реалізації, достатня точність для повільних процесів. Недоліки: низька швидкодія при зовнішніх збуреннях (наприклад, коливання температури води або навколишнього середовища) [4].
2. **Каскадна система регулювання.** Складається з двох регуляторів: основного (температурного) та допоміжного (наприклад, регулювання нагріву або потоку теплоносія). Внутрішній контур швидко реагує на збурення, а

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зовнішній — точно підтримує основний параметр. Переваги: підвищена точність і швидкодія. Недоліки: складність налаштування, необхідність двох регульованих величин [4].

3. **Система з компенсацією збурень.** Використовується додатковий канал, що враховує зміну зовнішніх збурень (наприклад, температура вхідної води). Це дозволяє регулятору активно змінювати керуючий сигнал до того, як збурення вплине на об'єкт. Переваги: висока точність і стабільність при змінних умовах. Недоліки: необхідність вимірювання збурень, ускладнення схеми [4].

4. **Комбінована система регулювання.** Поеднує в собі кілька типів регулювання: каскадне + компенсація збурень або ПІД + логічне управління. Переваги: оптимальна реакція на збурення, адаптивність до складних технологічних режимів. Недоліки: висока складність реалізації, потреба в потужнішому контролері [4].

1.2.2 Опис прийнятої структури АСК

Обрано одноконтурну систему автоматичного регулювання температури з ПІД-регулятором, реалізовану на основі ПЛК.

Обґрунтування вибору:

- Простота реалізації — не потребує складної апаратної або програмної логіки.
- Висока точність для процесу шотування, який має інерційну характеристику (температура змінюється повільно).
- Низька чутливість до швидких збурень — оскільки система має високу теплоємність, невеликі збурення не впливають критично.
- Достатня стабільність — налаштований ПІД-регулятор дозволяє підтримувати температуру в межах $\pm 1^\circ\text{C}$.

1.3. Технологічні параметри АСУТП ТОУ

1.3.1. Технологічний контроль

Для забезпечення надійного контролю технологічного процесу в автоклаві використовуються такі засоби вимірювання:

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Датчик температури — PTK 120-120 від Sensit (Чехія), діапазон вимірювання -50...+200 °С, вихідний сигнал 4–20 мА, точність ± 1 °С.
- Датчик тиску — SITRANS P DS III від Siemens (Німеччина), діапазон 0–10 бар, вихід 4–20 мА, точність $\pm 0,1$ бар.
- Ультразвуковий рівнемір — SITRANS Probe LU240 від Siemens (Німеччина), діапазон до 1,7 м, вихідний сигнал 4–20 мА.
- Витратомір — Promag 53 від Endress+Hauser (Швейцарія), вихідний сигнал 4–20 мА.

Усі датчики мають уніфіковані аналогові виходи (4–20 мА), що забезпечує зручність інтеграції з ПЛК та надійність передачі сигналів.

1.3.2. Автоматичне регулювання та керування

В якості центрального елемента системи керування обрано ПЛК Phoenix Contact (Німеччина), $U_{жив} = 24$ В, який має:

- 8 дискретних входів та 4 дискретні виходи,
- модуль аналогових входів IB IL AI 4/I-PAC (4 входи: 0...20 мА, 4...20 мА, -20...20 мА),
- модуль аналогових виходів IB IL AO 4/U-PAC (4 виходи: 0...10 В, -10...10 В).

Причини вибору:

- модульна розширюваність;
- висока точність аналогових сигналів;
- підтримка промислових протоколів;
- надійність і сумісність з існуючими засобами автоматизації.

ПЛК реалізує ПІД-регулювання температури, аналогове керування електроприводами клапанів Resideo M7410E/BELIMO (24 В) та дискретне керування сигналізацією.

1.3.3. Технологічна сигналізація

В системі передбачена індикація критичного перевищення тиску в автоклаві. Для індикації аварійної ситуації застосовано сигнальну арматуру AD22E-12DS

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(червоний колір, 24 В AC/DC, виробник АСКО-УкрЕм). Спрацювання сигналізації відбувається при перевищенні тиску понад 11 бар. Сигналізація реалізована за допомогою лампочки червоного кольору встановленої на щиті.

1.3.4. Технологічний захист та блокування

Система включає такі захисні функції:

- Аварійне відключення нагріву при температурі $> 135^{\circ}\text{C}$ або тиску > 11 бар.
- Блокування запуску автоклава при рівні води $< 0,3$ м.
- Програмне блокування повторного запуску після аварії до ручного скидання та з'ясування причин.

Ці заходи забезпечують безпечну експлуатацію обладнання та запобігають виходу його з ладу.

1.3.5. Живлення приладів та засобів автоматизації

Живлення системи автоматизації передбачає:

- Основне живлення 220 В AC — подається через автоматичний вимикач QF1 (RESI9, 16 A, Schneider Electric, Франція);
- Живлення 24 В DC — забезпечується акумуляторною батареєю PSU-2425LED (Kraft, Китай), що дозволяє підтримувати роботу системи під час короткочасного зникнення основного живлення та надавати постійний струм.

Усі компоненти системи розміщено у щиті автоматизації типу e.mbox.industrial.p.80.60.30z (800×600×300 мм, IP41, ENEXT, Китай).

1.4 Функції АСУТП

Автоматизована система керування технологічним процесом автоклава (АСУТП) виконує сукупність **управляючих, захисних та інформаційних функцій**, які забезпечують ефективне, безпечне та стабільне функціонування об'єкта [4].

1.4.1 Управляючі функції:

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Регулювання температури** – підтримання заданого значення температури в камері автоклава протягом усього циклу обробки продукту. Здійснюється за допомогою ПІД-регулятора, реалізованого в ПЛК, який керує роботою електронагрівального елемента.
- **Регулювання тиску** – автоматичне підтримання тиску в межах встановленого діапазону. У разі перевищення тиску відкривається електроклапан скидання.
- **Регулювання рівня води** – забезпечення необхідного рівня рідини в камері автоклава на початковому етапі циклу.
- **Регулювання витрати води** – контроль подачі води під час етапу охолодження.

1.4.2 Захисні функції:

- **Аварійне відключення нагріву** – спрацьовує при перевищенні критичних значень температури або тиску.
- **Блокування запуску циклу** – заборона запуску автоклава при недостатньому рівні води.
- **Програмне блокування повторного запуску** – до скидання аварійного стану та усунення причин порушення.

1.4.3 Інформаційні функції:

- **Моніторинг поточних параметрів** – постійне вимірювання та виведення на НМІ таких значень, як температура, тиск, рівень води та витрата.
- **Сигналізація аварійних станів** – світлова індикація про перевищення допустимих значень параметрів.
- **Архівація даних** – можливість запису параметрів процесу в SCADA-систему для подальшого аналізу.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5. Схема автоматизації функціональна

Функціональна схема автоматизації відображає взаємозв'язки між основними елементами системи керування та технологічного об'єкта. У ній позначені давачі, виконавчі механізми, контролер.

Схема автоматизації зображена в документі " ТА–11388.0013.002.АТХ.А". На схемі наведені чотири основні контури автоматичного регулювання, кожен з яких має свій вимірювальний датчик, засіб впливу на процес і логіку керування, реалізовану в ПЛК:

- **Контур регулювання температури** реалізовано з використанням датчика температури РТК 120-120 (позиція на схемі: 3а), сигнал з якого надходить до аналогового входу ПЛК. На основі ПД-регулювання формується сигнал керування для електронагрівального елемента.
- **Контур регулювання тиску** використовує датчик SITRANS P DS III (позиція на схемі: 4а). У разі перевищення допустимого значення тиску ПЛК відкриває клапан скидання пари.
- **Контур регулювання рівня води** реалізовано на базі ультразвукового рівнеміра SITRANS Probe LU240 (позиція на схемі: 2а). При зниженому рівні система відкриває клапан подачі води.
- **Контур регулювання витрати** побудовано з використанням витратоміра Promag 53 (позиція на схемі: 1а). Сигнал надходить до ПЛК, який керує клапаном охолодження в залежності від заданого режиму.

Виконавчі механізми представлені електроприводами клапанів типу Resideo M7410E/BELIMO, які підключаються до аналогових виходів ПЛК залежно від функції.

Функціональна схема є основою для розробки алгоритмів керування та програмного забезпечення системи.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.6. Схема структурна програмно-технічного комплексу

Структурна схема програмно-технічного комплексу (ПТК) визначає ієрархію компонентів автоматизованої системи та відображає взаємозв'язок між рівнями керування — від вимірювальних приладів до SCADA-системи (Рисунок 1.2).

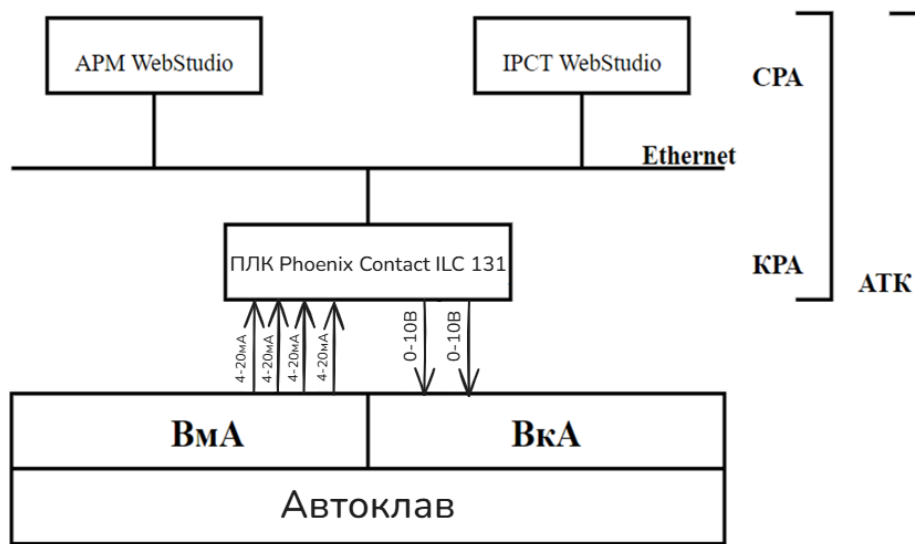


Рисунок 1.2 Схема структурна програмно-технічного комплексу

ПТК складається з таких рівнів:

- **Вимірювальна апаратура (ВмА):** давачі температури, тиску, рівня води, витрати води — з уніфікованим аналоговим виходом 4–20 мА. Ці пристрої забезпечують безперервний контроль стану технологічного процесу.
- **Програмований логічний контролер (ПЛК):** Phoenix Contact ILC 131, що приймає сигнали з ВмА через модулі аналогових входів (ІВ ІЛ АІ 4/І-РАС) і реалізує алгоритми ПІД-регулювання, логічного керування та захисту.
- **Виконавча апаратура (ВкА):** електроприводи клапанів, сигнальна арматура, аварійні зупинки. Вихідні сигнали з ПЛК керують цими пристроями залежно від поточної ситуації.
- **Контрольний рівень автоматизації (КРА):** локальна панель оператора з візуалізацією стану об'єкта, відображенням значень параметрів, аварій, та можливістю ручного втручання.

- **Супервізорний рівень автоматизації (CPA):** SCADA-система WebStudio, що забезпечує архівацію даних, ведення журналів подій, генерацію звітів, віддалений доступ і моніторинг усієї системи в режимі реального часу.

1.7 Перелік і аналіз джерел техніко-економічної ефективності АТК ТОО

Впровадження автоматизованої системи керування автоклавом обґрунтовується не лише з точки зору технічної доцільності, а й із позиції економічної ефективності. У цьому пункті розглянемо ключові аргументи на користь її використання та очікувані переваги у фінансовому і ресурсному вимірах.

1. Зменшення експлуатаційних витрат. Автоматизація процесів нагріву, подачі води та контролю стерилізації дозволяє мінімізувати втрати енергоносіїв (електроенергії, води), завдяки чіткому підтриманню заданих технологічних параметрів. Підвищення точності регулювання температури та тиску зменшує час стерилізації і, відповідно, знижує витрати.

2. Скорочення людського фактору. Ручне керування автоклавом потребує постійної присутності оператора, який має приймати рішення, контролювати параметри та вчасно реагувати на відхилення. Автоматизована система виконує ці функції самостійно, знижуючи навантаження на персонал, а отже — витрати на заробітну плату, надбавки за шкідливість та можливі помилки, пов'язані з втручанням людини.

3. Зниження кількості браку та аварій. Контроль параметрів у реальному часі та захисні алгоритми ПЛК (перевірка достовірності сигналу, аварійна зупинка при перевищенні меж) зменшують ризик псування продукції. Це безпосередньо впливає на зниження втрат сировини та витрат на переробку.

4. Підвищення ресурсу обладнання. Автоматичне керування з урахуванням плавного пуску, оптимальних температурних і тискових режимів забезпечує зниження зносу вузлів автоклава. Як наслідок — зменшується частота сервісного обслуговування та подовжується міжремонтний інтервал.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Можливість віддаленого моніторингу та діагностики. Завдяки SCADA-системі WebStudio забезпечено онлайн-доступ до параметрів процесу, архіву подій і звітів. Це зменшує час на обхід обладнання, дозволяє виявляти несправності до того, як вони спричинять аварію або зупинку виробництва.

6. Гнучкість і масштабованість системи. Проектована система побудована на модульному принципі. У майбутньому до неї можна легко додати нові функції (наприклад, контроль вологості, інтеграцію з ERP), що робить її вигідною з погляду довгострокових інвестицій.

Оцінка ефективності. Розрахункове зниження витрат на експлуатацію після впровадження АСК становить до 20–25 % у порівнянні з ручним режимом роботи. Зниження браку — приблизно на 15 %. Орієнтовний термін окупності системи — від 10 до 14 місяців при середній інтенсивності експлуатації.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК САР

2.1 Інженерний розрахунок вимірювальних каналів САР

2.1.1 Перелік вимірювальних каналів

Для реалізації автоматизованої системи керування автоклавом передбачено впровадження чотирьох основних вимірювальних каналів (ВК), кожен з яких відповідає за контроль окремого критично важливого технологічного параметра. Перелік вимірювальних каналів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Перелік вимірювальних каналів системи автоматизації автоклава

№	Назва параметра	Тип давача	Діапазон вимірювання	Вихідний сигнал	Похибка вимірювання
1	Температура	РТК 120-120 (Sensit, Чехія)	-50...+200 °C	4-20 мА	±1 °C
2	Тиск	SITRANS P DS III (Siemens)	0-10 бар	4-20 мА	±0,1 бар
3	Рівень води	SITRANS Probe LU240 (Siemens)	0-1,7 м	4-20 мА	±1 %
4	Витрата води	Promag 53 (Endress+Hauser)	до 10 л/хв	4-20 мА	±0,2 л/хв

Усі вимірювальні канали побудовані на основі датчиків з уніфікованим аналоговим виходом 4-20 мА, що дозволяє спростити інтеграцію з ПЛК та підвищити завадостійкість сигналів при їх передачі.

Кожен з каналів є частиною інформаційно-вимірювальної системи та бере участь в реалізації управляючих, захисних або інформаційних функцій АСУТП. Зокрема:

- Канал температури використовується для підтримання температурного режиму шотування.
- Канал тиску відповідає за контроль безпечного тиску в камері автоклава.
- Канал рівня забезпечує коректний запуск циклу стерилізації.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Канал витрати необхідний для реалізації контрольованого охолодження продукції.

2.1.2 Схеми структурні вимірювальних каналів

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) автоматизованої системи керування автоклавом включає чотири основні вимірювальні канали: температури, тиску, рівня та витрати води. Структурні схеми цих каналів відображають послідовність перетворення фізичного параметра в електричний сигнал та його подальшу обробку в ПЛК.

Кожен вимірювальний канал має типову структуру:

Датчик → Кабельна лінія → Аналоговий вхід ПЛК → Обробка в ПЛК

Опис структурних схем:

1. Канал вимірювання температури (Рисунок 2.1)



Рисунок 2.1 – Схема каналу вимірювання температури

- Датчик температури **РТК 120-120 (4–20 мА)** встановлений у робочій камері автоклава.
- Через екранований кабель сигнал подається на аналоговий вхід модуля **ІВ ІЛ АІ 4/І-РАС** ПЛК.
- У ПЛК здійснюється первинна обробка, масштабування та передача даних у SCADA.

2. Канал вимірювання тиску (Рисунок 2.2)

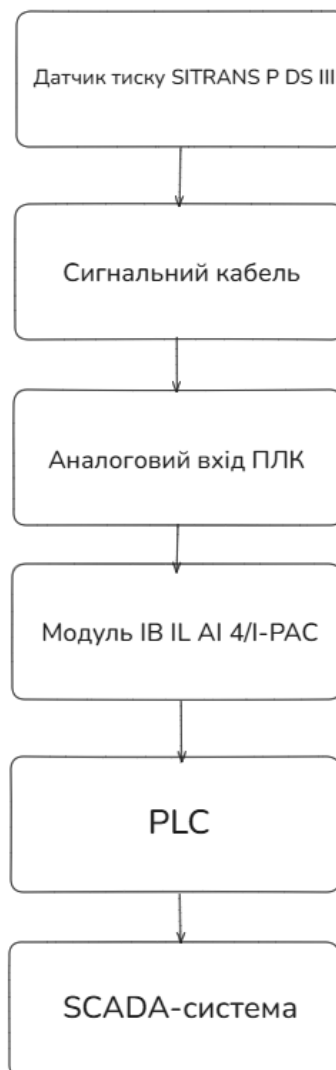


Рисунок 2.2 – Схема каналу вимірювання тиску

- Датчик **SITRANS P DS III** (0–10 бар) передає уніфікований сигнал 4–20 мА.
- Підключення здійснюється аналогічно до температурного каналу.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Значення тиску обробляється в ПЛК для формування управляючої дії на клапан скидання.

3. Канал вимірювання рівня води (Рисунок 2.3)

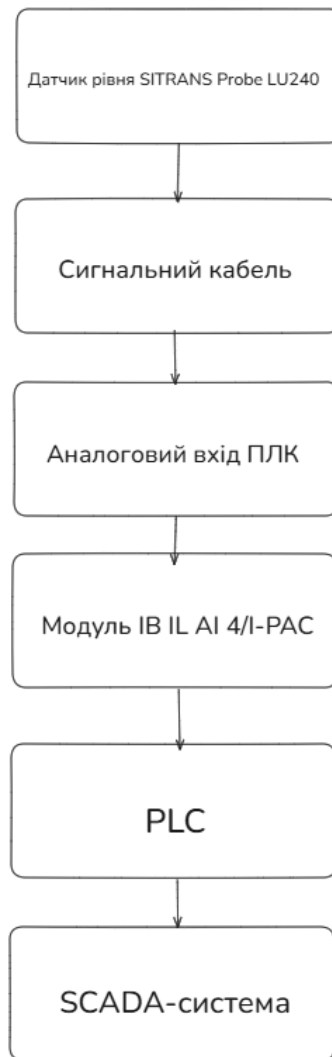


Рисунок 2.3 – Схема каналу вимірювання рівня води

- Ультразвуковий рівнемір **SITRANS Probe LU240** встановлений вертикально у верхній частині камери.
- Сигнал подається на аналоговий вхід ПЛК.
- Використовується для запуску/блокування циклу.

4. Канал вимірювання витрати (Рисунок 2.4)



Рисунок 2.4 – Схема каналу вимірювання витрати

- Проточний витратомір **Promag 53** встановлений у лінії подачі охолоджувальної води.
- Сигнал 4–20 мА надходить до ПЛК, де формується керуюча дія на клапан подачі води.

Загальні характеристики:

- Усі давачі мають аналоговий вихід 4–20 мА, що спрощує комутацію та уніфікує обробку сигналів.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Використовуються екрановані кабелі з заземленням екрану на стороні ПЛК.
- Для захисту від перенапруг можливе використання захисних стабілізаторів на аналогових входах.

2.1.3 Особливості електричних підключень датчиків вимірювальних каналів

У системі автоматизації автоклава використовуються чотири датчики з аналоговим уніфікованим виходом 4–20 мА:

- Датчик температури PTK 120-120
- Датчик тиску SITRANS P DS III
- Датчик рівня SITRANS Probe LU240
- Витратомір Promag 53

Ці датчики підключаються до модуля аналогових входів IB IL AI 4/I-PAC контролера Phoenix Contact, який підтримує стандартний струмовий діапазон 4–20 мА з роздільною здатністю 12 біт.

Особливості по типах датчиків:

- 1. Температурний датчик PTK 120-120** — є термометром опору з інтегрованим перетворювачем сигналу у струм 4–20 мА. Має двопровідне підключення.
 - Компенсація холодного спаю не потрібна (перетворювач внутрішній).
 - Лінеаризація температури виконується у ПЛК за формулою датчика (наприклад, Pt100).
- 2. Датчик тиску SITRANS P DS III** — підключається безпосередньо до аналогового входу модуля ПЛК.
- 3. Датчик рівня SITRANS LU240** — підключається трьома провідниками.
- 4. Витратомір Promag 53** — має окремий перетворювач сигналу з активним живленням.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1.4 Монтаж технічних засобів вимірювальних каналів

Монтаж технічних засобів вимірювальних каналів автоматизованої системи керування автоклавом виконується з дотриманням вимог ПУЕ, ДСТУ, НПАОП та норм електробезпеки. До складу вимірювальних каналів входять: давачі технологічних параметрів, з'єднувальні кабелі, клемні з'єднання, модулі аналогового вводу та контролер.

Встановлення давачів

- **Датчик температури РТК 120-120** монтується в зоні максимального теплового навантаження — у верхній частині робочої камери автоклава, безпосередньо в обігрівачому середовищі. Монтаж проводиться через різьбовий штуцер G1/2", з герметизацією ущільнюючим кільцем.
- **Датчик тиску SITRANS P DS III** встановлюється на бічному фланці автоклава, в контрольному штуцері, відповідно до напрямку потоку, вказаного на корпусі. З'єднання трубне, з обов'язковим ізолюванням вібраційними компенсаторами.
- **Датчик рівня SITRANS Probe LU240** закріплюється вертикально зверху, через фланець або різьбову муфту. У разі наявності конденсату — монтується з відбійним екраном, згідно рекомендацій виробника.
- **Витратомір Promag 53** встановлюється у горизонтальній ділянці трубопроводу охолоджувальної води, після запірної арматури. Вісь витратоміра повинна бути горизонтальною, корпус — заземленим.

2.1.5 Захист технічних засобів вимірювальних каналів від перешкод

У системі автоматизації автоклава, що побудована на основі ПЛК Phoenix Contact, передбачено декілька рівнів захисту вимірювальних каналів від впливу зовнішніх і внутрішніх перешкод, які можуть вплинути на точність та достовірність результатів вимірювання. Основними джерелами перешкод є електромагнітні наведення від силового обладнання, індуктивних навантажень, імпульсні завади в мережі живлення та міжкабельні наведення.

Екранізація та заземлення кабелів. Усі аналогові сигнальні лінії виконуються екранованими кабелями, які мають суцільний мідний екран у

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вигляді обплетення з коефіцієнтом покриття не менше 85%. Обов'язковою умовою є підключення екрана до шини захисного заземлення з одного боку — на стороні контролера або модуля аналогових входів. Це дозволяє уникнути утворення "петель струму" та мінімізувати наведення високочастотних завад.

Розділення кабельних трас. Сигнальні та силові кабелі прокладаються в різних кабельних лотках на відстані не менше ніж 30 см один від одного. На ділянках перетину силових і сигнальних кабелів перехід виконується під прямим кутом (90°), що знижує вплив електромагнітних полів.

Зовнішня фільтрація сигналів. На вході аналогових модулів ІВ ІЛ АІ 4/І-РАС встановлені RC-фільтри (низькочастотні фільтри типу RC) з частотою зрізу 10 Гц, що дозволяє ефективно пригнічувати високочастотні наведення. Крім того, на дискретних входах застосовуються варистори для захисту від імпульсних перенапруг.

Іскробезпечний монтаж. Хоча об'єкт не належить до вибухонебезпечної зони, частина кабельних трас виконана за нормами іскробезпечного монтажу — із застосуванням гофрованих металевих труб і металорукавів з контуром заземлення, що унеможливорює виникнення іскри при короткому замиканні.

Програмна фільтрація в ПЛК. Для кожного вимірювального каналу у ПЛК реалізована цифрова експоненціальна фільтрація, що дозволяє згладжувати сплески, викликані короточасними перешкодами, не впливаючи на інерційні характеристики вимірюваного сигналу. Це особливо важливо для температурного каналу, де стабільність сигналу критично важлива для точності регулювання.

2.1.6 Схеми структурної надійності вимірювальних каналів

У процесі експлуатації автоматизованої системи керування автоклавом особливе значення має забезпечення достовірності та безперервності надходження сигналів з вимірювальних каналів. Оскільки від надійності первинної інформації залежать рішення системи керування, були впроваджені заходи щодо підвищення структурної надійності каналів.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У проєкті передбачено використання одного датчика для кожного технологічного параметра. Це зумовлено оптимальним балансом між рівнем ризику, вартістю реалізації та розмірами системи. Всі датчики мають уніфікований вихідний сигнал 4–20 мА, який дозволяє виявляти обриви, коротке замикання та перенапругу по лінії.

У системі використано наступні прилади:

- Датчик температури – PTK 120-120 (Sensit, Чехія);
- Датчик тиску – SITRANS P DS III (Siemens);
- Датчик рівня – SITRANS Probe LU240 (Siemens);
- Витратомір – Promag 53 (Endress+Hauser, Швейцарія).

Сигнали з усіх приладів надходять на модуль аналогових входів IB IL AI 4/I-PAC, який входить до складу програмованого логічного контролера Phoenix Contact. Модуль підтримує вбудовану діагностику обриву та перенапруги для кожного каналу, що забезпечує базову перевірку справності сигналу.

Хоча резервування датчиків у системі не застосовується, завдяки реалізованим рішенням досягнуто необхідного рівня функціональної безпеки для об'єкта середньої складності. Усі критичні події обробляються системою сигналізації, а оператор має повний контроль над ситуацією через SCADA-інтерфейс. Також передбачено перехід у безпечний стан у разі виявлення недостовірності сигналу: наприклад, припинення нагріву при втраті температурного сигналу.

Таким чином, структурна надійність забезпечується не дублюванням каналів, а комплексом апаратно-програмних рішень контролю достовірності, діагностики та індикації. Це дозволяє підтримувати стабільну роботу і вчасно реагувати на можливі збої в системі.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

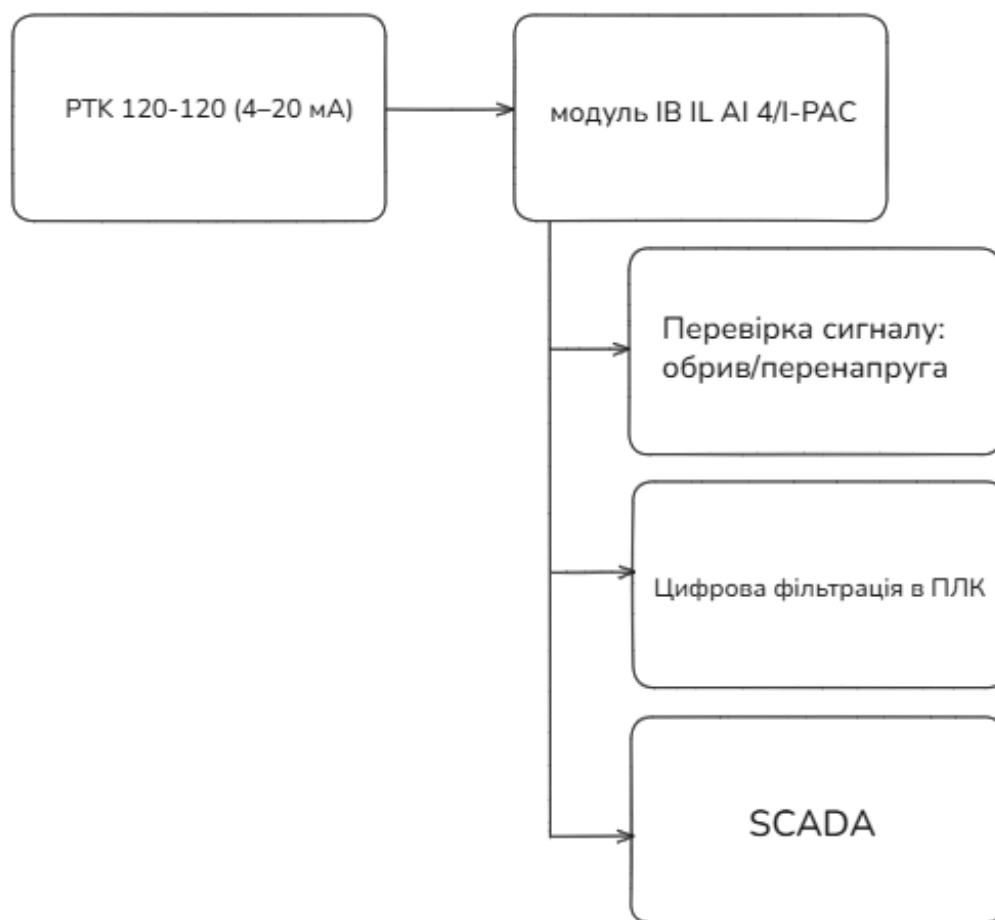


Рисунок 2.5 Схема надійності вимірювального каналу температури

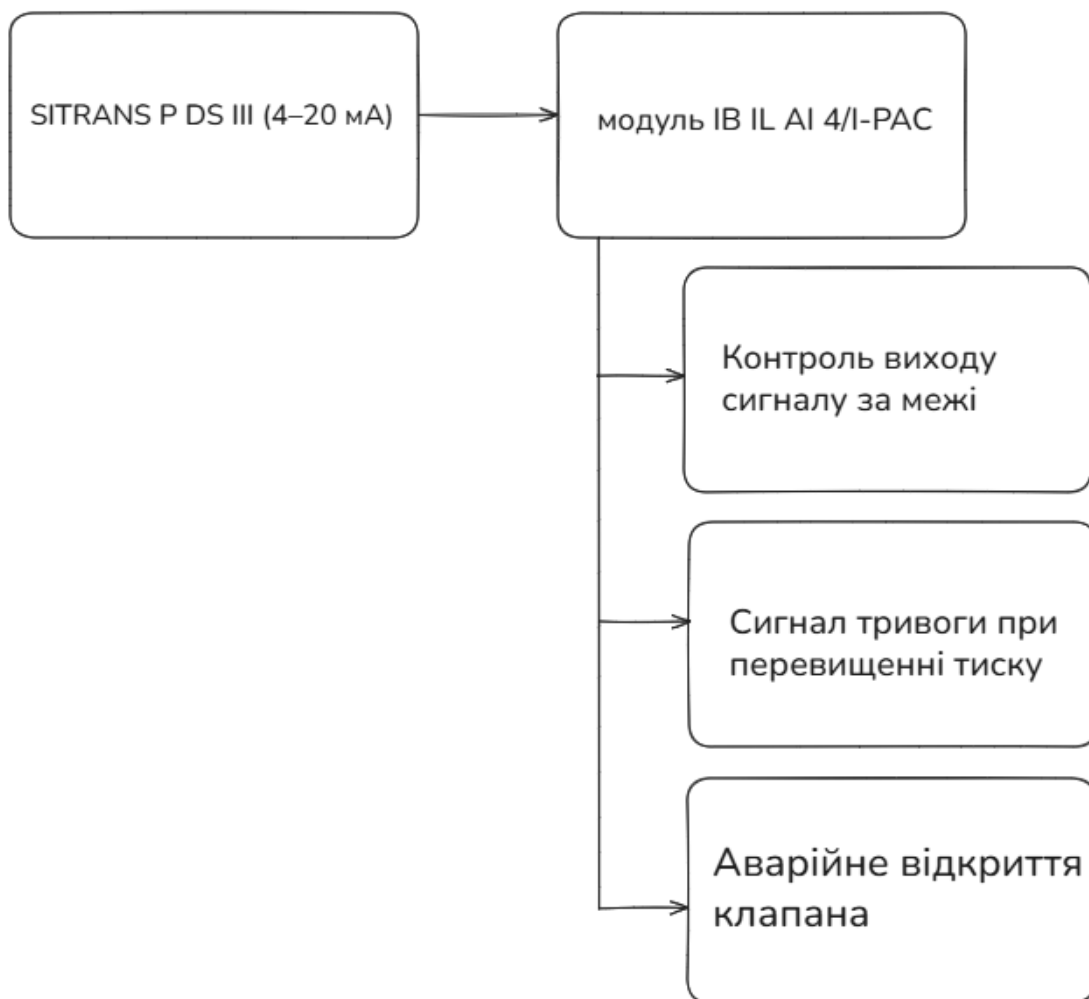


Рисунок 2.6 Схема надійності вимірювального каналу тиску

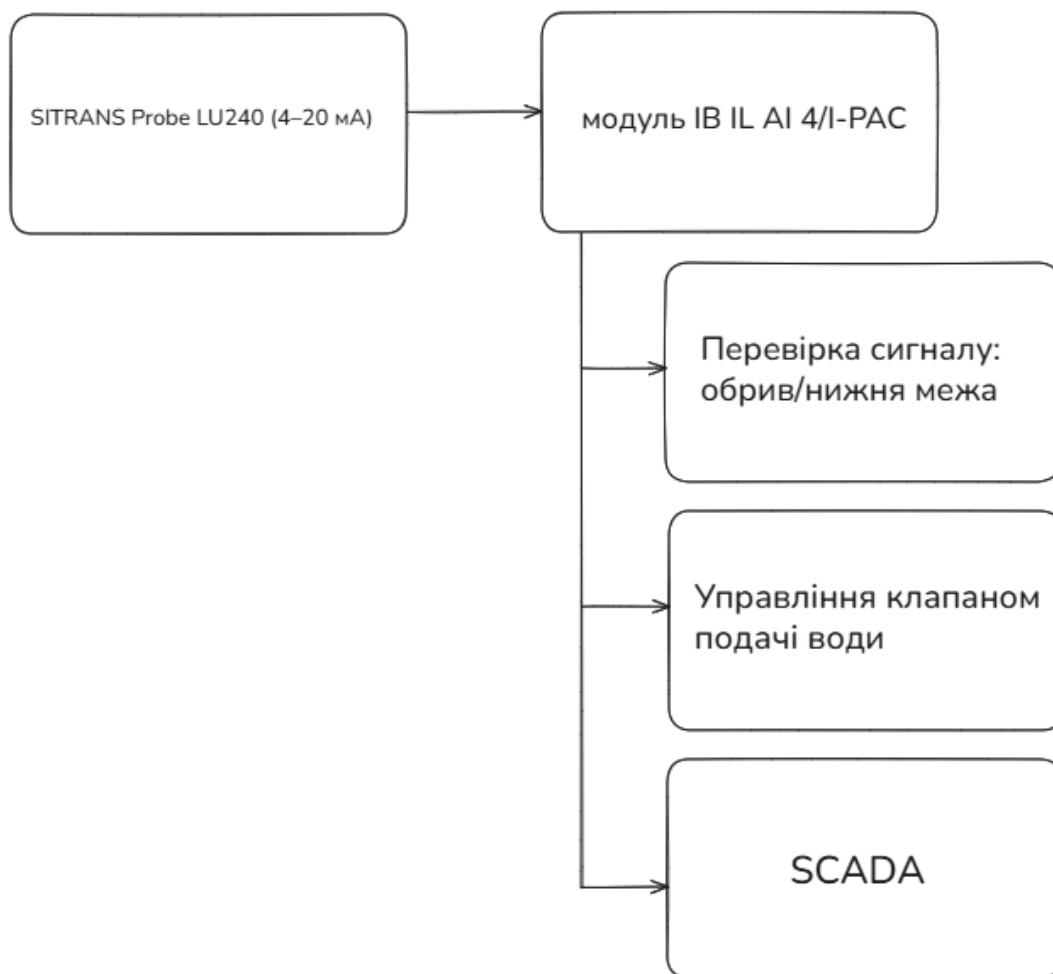


Рисунок 2.7 Схема надійності вимірювального каналу рівня

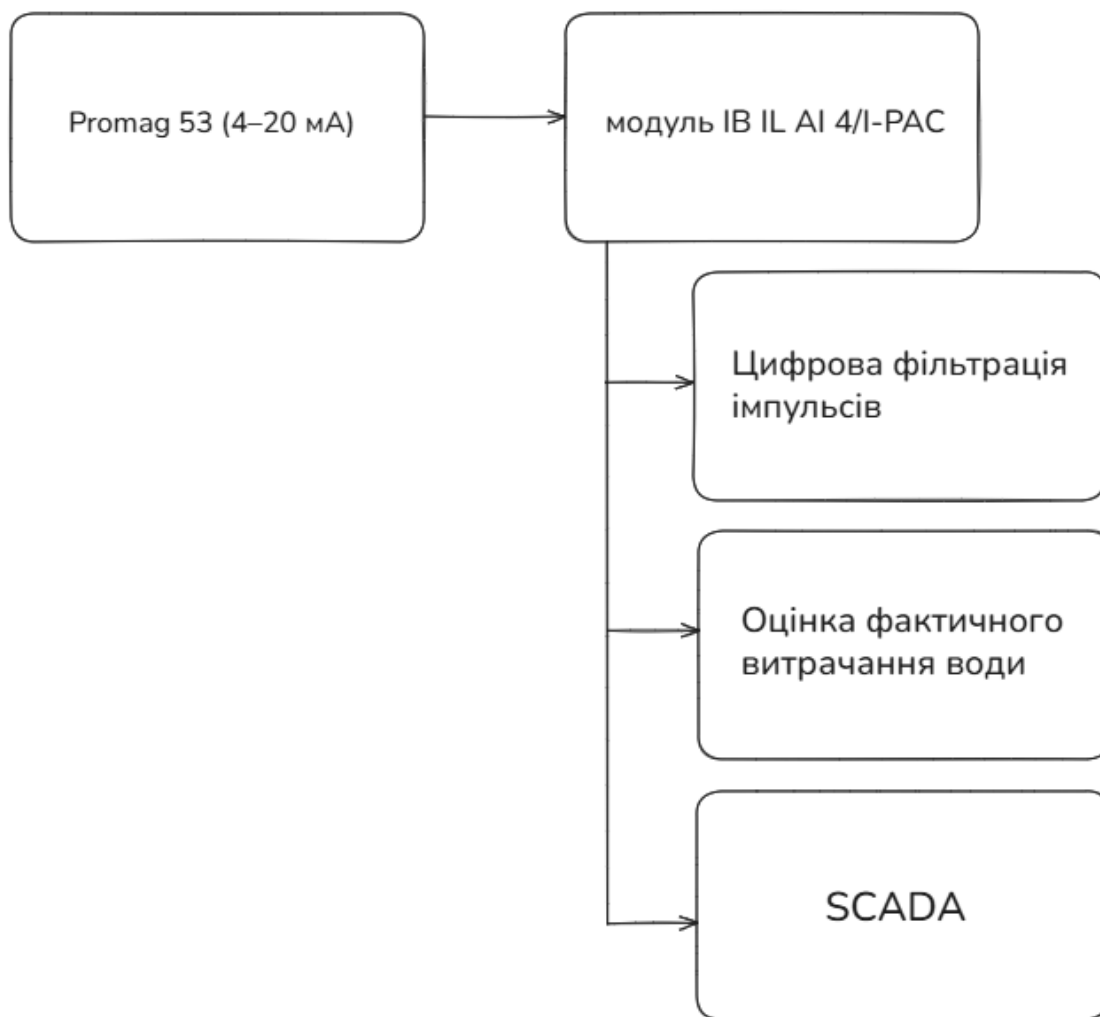


Рисунок 2.8 Схема надійності вимірювального каналу витрати

2.1.7 Метрологічний розрахунок вимірювальних каналів

Метрологічне обґрунтування точності вимірювання параметрів у системі автоматизованого керування автоклавом необхідне для забезпечення відповідності системи вимогам до якості стерилізації. Найбільш критичними параметрами для керування є температура, тиск, рівень і витрата води. У цьому пункті виконано аналіз основних джерел похибки вимірювальних каналів та зведено їх до загального показника абсолютної або відносної похибки.

Сумарна абсолютна похибка визначається за формулою:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta_{\text{датч}}^2 + \Delta_{\text{АЦП}}^2)}$$

Відносна похибка розраховується за формулою:

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta = (\Delta_{\Sigma} / X_{\max}) \times 100\%$$

Канал вимірювання температури

- Датчик: термоперетворювач опору Pt100, клас точності В.
- Діапазон вимірювання: 0...200 °С.
- $\Delta_{\text{датч}} = \pm(0,3 + 0,005 \times 120) = \pm 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\Delta_{\text{АЦП}} = 1/4096 \times 16 \times 12,5 \approx 0,049 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\Delta_{\Sigma} = \sqrt{(0,9^2 + 0,049^2)} \approx 0,901 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\delta = (0,901 / 200) \times 100\% \approx 0,45\%$

Канал вимірювання тиску

- Датчик: Siemens SITRANS P DS III
- Діапазон: 0...10 бар
- $\Delta_{\text{датч}} = \pm 0,1 \text{ бар}$
- $\Delta_{\text{АЦП}} = 1/4096 \times 16 \times 0,625 \approx 0,0024 \text{ бар}$
- $\Delta_{\Sigma} = \sqrt{(0,1^2 + 0,0024^2)} \approx 0,1001 \text{ бар}$
- $\delta = (0,1001 / 10) \times 100\% \approx 1,001\%$

Канал вимірювання рівня

- Датчик: SITRANS Probe LU240
- Діапазон: 0...1,7 м
- $\Delta_{\text{датч}} = \pm 1\% \text{ від } 1,7 = \pm 0,017 \text{ м}$
- $\Delta_{\text{АЦП}} = 1/4096 \times 16 \times 0,10625 \approx 0,000414 \text{ м}$
- $\Delta_{\Sigma} = \sqrt{(0,017^2 + 0,000414^2)} \approx 0,01701 \text{ м}$
- $\delta = (0,01701 / 1,7) \times 100\% \approx 1,00\%$

Канал вимірювання витрати

- Датчик: Promag 53
- Діапазон: 0...10 л/хв
- $\Delta_{\text{датч}} = \pm 0,2 \text{ л/хв}$
- $\Delta_{\text{АЦП}} = 1/4096 \times 16 \times 0,625 \approx 0,00244 \text{ л/хв}$
- $\Delta_{\Sigma} = \sqrt{(0,2^2 + 0,00244^2)} \approx 0,2001 \text{ л/хв}$
- $\delta = (0,2001 / 10) \times 100\% \approx 2,001\%$

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Підсумкова таблиця похибок

№	Вимірюваний параметр	Абсолютна похибка Δ_{Σ}	Відносна похибка δ	Діапазон вимірювання
1	Температура	$\pm 0,901$ °C	0,45 %	0–200 °C
2	Тиск	$\pm 0,1001$ бар	1,001 %	0–10 бар
3	Рівень	$\pm 0,01701$ м	1,00 %	0–1,7 м
4	Витрата	$\pm 0,2001$ л/хв	2,001 %	0–10 л/хв

Аналіз показав, що сумарні абсолютні похибки не перевищують допустимих значень, визначених вимогами до точності вимірювань у межах технологічного процесу. Відносна похибка для всіх каналів перебуває в межах 0,45–2,001 %, що є прийнятним для реалізації надійного та стабільного керування у складі автоматизованої системи управління.

2.1.8 Розрахунок надійності вимірювальних каналів

Надійність вимірювальних каналів (ВК) є ключовим параметром, який визначає здатність системи точно і стабільно передавати інформацію про стан об'єкта керування впродовж визначеного терміну експлуатації без відмов.

Структура вимірювального каналу

Кожен вимірювальний канал складається з:

- первинного перетворювача (давача),
- лінії передачі сигналу,
- модуля аналогового вводу ПЛК,
- логічної обробки сигналу у ПЛК.

У проєкті автоматизації автоклава реалізовано чотири основні ВК:

1. Вимірювання температури – датчик PTK 120-120.
2. Вимірювання тиску – датчик SITRANS P DS III.
3. Вимірювання рівня – ультразвуковий рівнемір SITRANS Probe LU240.
4. Вимірювання витрати – витратомір Promag 53.

Усі сенсори мають аналоговий вихід 4–20 мА, що сприяє надійності передачі сигналу за рахунок високої стійкості до електромагнітних перешкод.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка надійності компонентів

Для оцінки надійності використовується імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ за експоненціальним законом:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

де:

- λ – інтенсивність відмов, 1/год;
- t – період експлуатації, год.

Значення інтенсивності відмов:

- датчик температури: $\lambda_{\text{д.тем.}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$,
- датчик тиску: $\lambda_{\text{д.тиск.}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$,
- датчик рівня: $\lambda_{\text{д.рівн.}} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$,
- витратомір: $\lambda_{\text{д.вит.}} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$,
- кабельна лінія: $\lambda_{\text{к.л.}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$,
- модуль аналогового вводу: $\lambda_{\text{а.в.}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$,
- період експлуатації: $t = 8760 \text{ год}$.

1. Канал вимірювання температури

$$\lambda_{\text{тем.}} = \lambda_{\text{д.тем.}} + \lambda_{\text{к.л.}} + \lambda_{\text{а.в.}} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

$$P(8760) = e^{-3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} \approx e^{-0,03066} \approx 0,9698 \%$$

2. Канал вимірювання тиску

$$\lambda_{\text{тиск.}} = \lambda_{\text{д.тиск.}} + \lambda_{\text{к.л.}} + \lambda_{\text{а.в.}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

$$P(8760) = e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} \approx e^{-0,02628} \approx 0,9741 \%$$

3. Канал вимірювання рівня

$$\lambda_{\text{рівн.}} = \lambda_{\text{д.рівн.}} + \lambda_{\text{к.л.}} + \lambda_{\text{а.в.}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

$$P(8760) = e^{-4 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} \approx e^{-0,03504} \approx 0,9655 \%$$

4. Канал вимірювання витрати

$$\lambda_{\text{вит.}} = \lambda_{\text{д.вит.}} + \lambda_{\text{к.л.}} + \lambda_{\text{а.в.}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

$$P(8760) = e^{-4,5 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} \approx e^{-0,03942} \approx 0,9613 \%$$

Імовірність безвідмовної роботи кожного вимірювального каналу перевищує 96%, що є достатнім для системи автоматичного регулювання

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промислового призначення. Найбільш надійним виявився канал тиску, найменш – канал витрати через складнішу конструкцію витратоміра.

2.1.9 Функції первинної обробки даних вимірювання в ПЛК

У системі автоматизації автоклава функції первинної обробки даних виконуються програмованим логічним контролером (ПЛК) Phoenix Contact, який приймає аналогові сигнали від давачів та здійснює їх подальшу обробку перед передачею до SCADA-системи або перед використанням у регуляторах.

Основні функції первинної обробки:

1. Аналого-цифрове перетворення (АЦП)

Всі датчики мають уніфікований аналоговий вихід 4–20 мА. Модулі аналогових входів ПЛК перетворюють ці сигнали у цифрову форму.

- 4 мА відповідає мінімальному значенню,
- 20 мА – максимальному.

2. Лінеаризація сигналу

Після АЦП отримане значення масштабується до фізичної величини згідно з калібрувальними характеристиками приладу.

3. Фільтрація шумів

Для зменшення впливу імпульсних перешкод реалізовано цифрову фільтрацію. Це дозволяє усунути випадкові коливання значень та зменшити псевдоаварійні спрацювання.

4. Перевірка на вихід за межі допустимих значень

Контролер виконує аналіз на:

- вихід сигналу за фізично допустимі межі (наприклад, <3,8 мА або >20,5 мА),
- наявність обриву/короткого замикання лінії (наприклад, 0 мА або 24 мА).

У разі виявлення аварійного стану формується сигнал переходу в безпечний режим.

5. Формування логічних сигналів на основі порогів

На основі оброблених аналогових сигналів формуються дискретні логічні сигнали, які використовуються:

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- для сигналізації (наприклад, температура $> 135^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ аварія),
- для запуску захистів (наприклад, рівень $< 0,3\text{ м}$ $\rightarrow$ блокування запуску автоклава).

Функції первинної обробки, реалізовані в ПЛК, дозволяють забезпечити точне, надійне та безпечне зчитування та інтерпретацію аналогових сигналів із датчиків. Це критично важливо для ефективної реалізації алгоритмів автоматичного регулювання, виявлення аварійних ситуацій та взаємодії з оператором.

2.1.10 Висновок щодо роботоздатності вимірювальних каналів САР

Проведений аналіз та розрахунки вимірювальних каналів автоматизованої системи керування автоклавом підтверджують їх високу роботоздатність, що забезпечується наступними технічними та функціональними характеристиками:

- **Точність і стабільність** переданих сигналів гарантована застосуванням уніфікованого аналогового інтерфейсу 4–20 мА для всіх сенсорів, що зменшує вплив електромагнітних перешкод і покращує якість вимірювання.
- **Надійність компонентів** підтверджена відповідним розрахунком (імовірність безвідмовної роботи понад 96% протягом року), а також використанням промислових сертифікованих приладів від відомих виробників (Siemens, Endress+Hauser, Sensit).
- **Впровадження фільтрації, перевірки меж і діагностики** у ПЛК дозволяє оперативно виявляти аномалії в роботі датчиків та забезпечити стійке функціонування системи навіть за наявності випадкових збурень або часткових відмов.
- **Функціональна гнучкість ПЛК** дає змогу масштабувати або модифікувати систему без суттєвих змін в апаратній частині, що підвищує довгострокову життєздатність рішення.

Таким чином, реалізовані вимірювальні канали повністю відповідають вимогам до систем автоматичного регулювання за критеріями точності, надійності, безпеки та функціональної повноти. Це дозволяє ефективно

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізувати алгоритми автоматичного регулювання температури, тиску, рівня та витрати, що критично важливо для забезпечення якості продукції та безпеки експлуатації автоклава.

2.2 Інженерний розрахунок регулювально-виконавчих каналів САР

2.2.1 Перелік систем автоматичного регулювання

У складі системи автоматизації автоклава передбачено реалізацію наступних систем автоматичного регулювання (САР):

Таблиця 2.3 – Перелік систем автоматичного регулювання

№	Назва САР	Тип САР	Уставка	Регульований параметр
1	САР температури	Одноконтурна	120°C	Температура в автоклаві
2	САР тиску	Одноконтурна	2 бар	Тиск в автоклаві
3	САР рівня води	Одноконтурна	1,5 м	Рівень рідини
4	САР витрати води	Одноконтурна	5 л/хв	Витрата води

Обґрунтування типу САР: усі САР реалізовано як одноконтурні з ПІД-регулюванням, що обумовлено інерційним характером технологічного процесу, простотою реалізації в ПЛК, а також достатньою ефективністю для досягнення стабільних параметрів без необхідності ускладнення структури керування.

2.2.2 Функціональна і структурна схеми САР

Функціональна схема САР

Функціональна схема системи автоматичного регулювання (САР) відображає логічну послідовність взаємодії елементів: від задання уставки до дії виконавчого механізму на об'єкт і формування зворотного зв'язку. Вона показує, як працює контур регулювання в динаміці, з урахуванням наявності

вимірювального каналу, ПЛК-регулятора, виконавчого механізму, зворотного зв'язку та технологічного об'єкта.

Функціональна схема є універсальною для всіх контурів САР у даному проєкті, які реалізовано як одноконтурні ПІД-регульовані системи із негативним зворотним зв'язком.



Рисунок 2.9 Функціональна схема САР

Структурна схема САР

Структурна схема відображає апаратні зв'язки між елементами САР: давачем, ПЛК, регулятором, виконавчим органом і об'єктом керування. Для прикладу беремо САР рівня рідини в автоклаві.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Елементи структурної схеми:

- **Вимірювальний перетворювач:** SITRANS Probe LU240
(ультразвуковий, 4–20 мА)
- **ПЛК:** Phoenix Contact ILC 131, з модулем аналогових входів IB IL AI 4/I
PAC
- **Регулятор:** ПІД-контур, реалізований у програмному середовищі
CoDeSys
- **Аналоговий вихід ПЛК:** IB IL AO 4/U-PAC (0–10 В)
- **Виконавчий механізм:** електропривідний клапан подачі води.
- **Об'єкт керування:** водяна сорочка автоклава.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

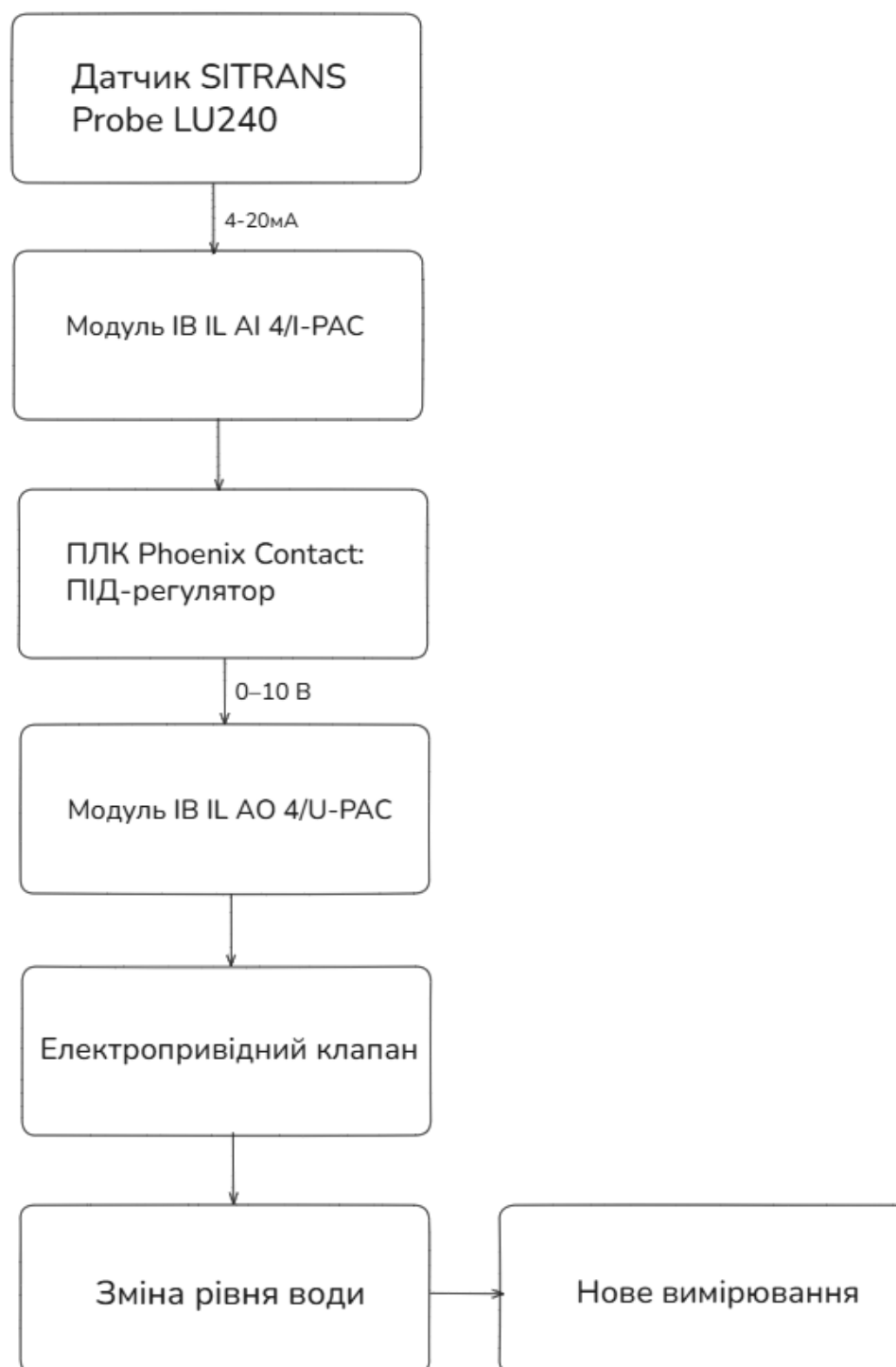


Рисунок 2.10 Структурна схема для САР рівня

2.2.3 Схема структурна регульовально-виконавчого каналу САР

Структурна схема регульовально-виконавчого каналу (РВК) САР автоклава ілюструє взаємозв'язок між елементами, що реалізують управляючу дію, починаючи від формування сигналу помилки до фізичного впливу на об'єкт керування. У даному проєкті реалізовано чотири основні контури автоматичного

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання: температури, тиску, рівня та витрати води. Розглянемо загальну структуру РВК на прикладі контуру регулювання тиску (Рисунок 2.11) [4].

Складові структурної схеми включають:

- **Датчик тиску** (SITRANS P DS III, Siemens) – вимірює абсолютне значення тиску в камері автоклава та формує аналоговий сигнал 4–20 мА.
- **Аналоговий вхід ПЛК** (модуль IB IL AI 4/I-PAC) – приймає сигнал із датчика і передає його на центральний процесор ПЛК для аналізу.
- **Програмований логічний контролер** (Phoenix Contact ILC 131) – обробляє дані з датчика, порівнює значення з уставкою тиску, і за допомогою вбудованого ПІД-регулятора формує сигнал керування.
- **Аналоговий вихід ПЛК** – подає керуючий сигнал на електроклапан скиду тиску.
- **Електроклапан скиду тиску** – спрацьовує у відповідь на сигнал від ПЛК, здійснюючи фізичний вплив (скидання пари з камери автоклава), що призводить до зниження тиску до безпечного рівня.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

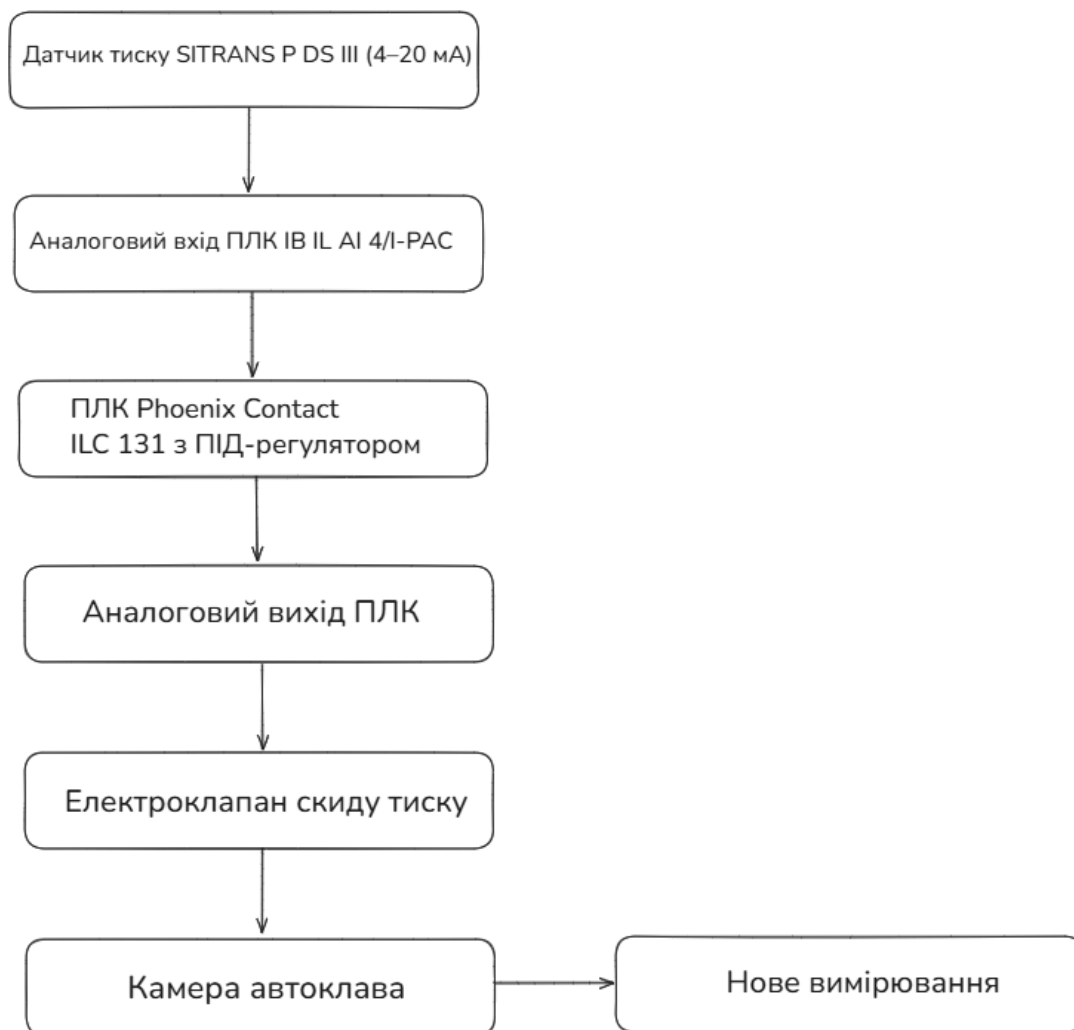


Рисунок 2.11 Схема структурна регулювально-виконавчого каналу CAP

2.2.4 Схема структурна програмно-технічних засобів CAP

Структурна схема програмно-технічних засобів (ПТЗ) системи автоматичного регулювання тиску (CAP) автоклава відображає апаратну реалізацію замкненого контуру керування на базі модульного програмованого логічного контролера Phoenix Contact. Усі сигнали передаються через стандартні аналогові інтерфейси 4–20 мА та 0–10 В, що забезпечує точність, швидкодію та надійність регулювання (Рисунок 2.12) [4].

До складу ПТЗ входять наступні ключові елементи:

- **Датчик тиску SITRANS P DS III** — забезпечує безперервне вимірювання тиску в камері автоклава та формує аналоговий сигнал у діапазоні 4–20 мА.

- **Модуль аналогового вводу ІВ ІЛ АІ 4/І-РАС** — приймає аналоговий сигнал від датчика та передає його до центрального процесора ПЛК для подальшої обробки.
- **Програмований логічний контролер Phoenix Contact ІЛС 131** — виконує функції порівняння поточного значення тиску з уставкою, обчислює відхилення та формує сигнал керування на основі вбудованого ПІД-регулятора.
- **Модуль аналогового виходу ІВ ІЛ АО 4/І-РАС** — перетворює керуючий сигнал ПЛК у напругу 0–10 В, яка передається на виконавчий механізм.
- **Електропривідний регулюючий клапан скиду води** — приймає сигнал керування у форматі 0–10 В та регулює ступінь відкриття клапана, забезпечуючи контрольований скидання води з камери автоклава. Це дозволяє знижувати внутрішній тиск шляхом зменшення об'єму нагрітої рідини.
- **Камера автоклава** — об'єкт регулювання, в якому відбуваються зміни тиску внаслідок дії виконавчого механізму.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

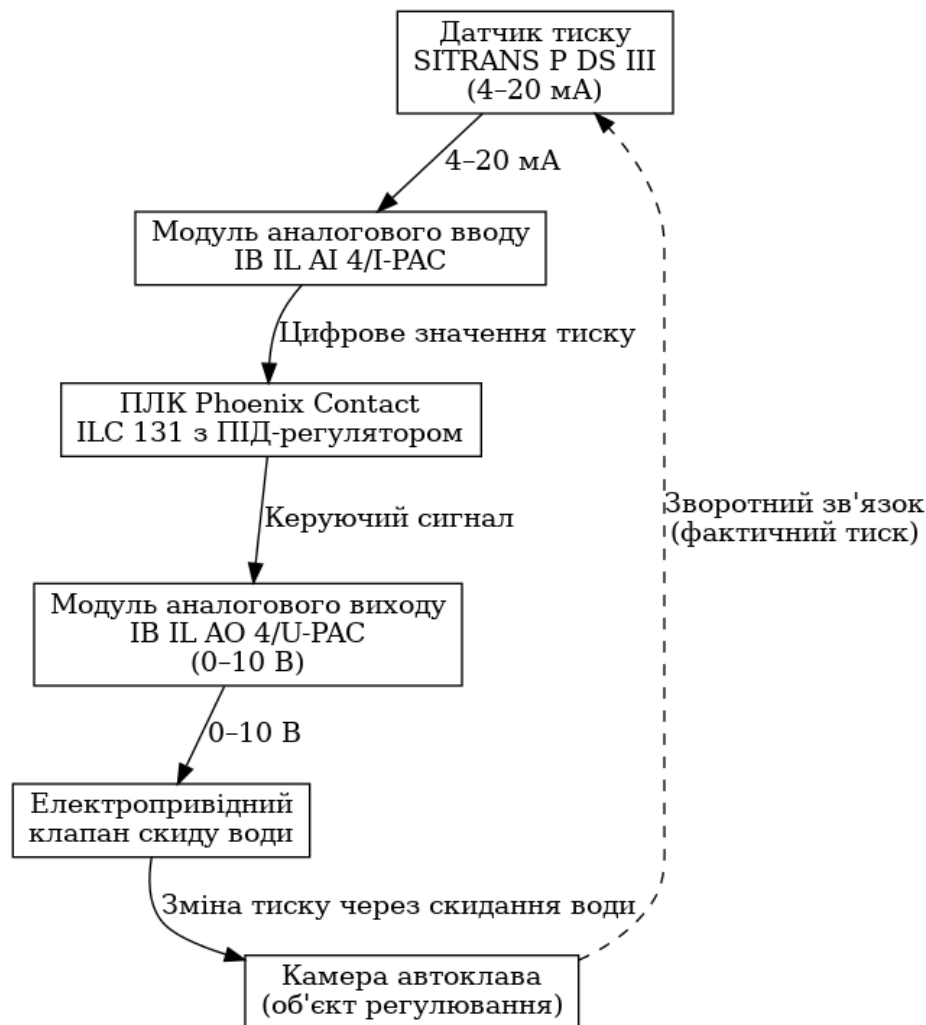


Рисунок 2.12 Схема структурна програмно-технічних засобів САР

Усі компоненти системи розміщуються у щиті автоматизації з класом захисту IP41, що забезпечує захист від зовнішніх впливів.

Завдяки використанню високоякісних компонентів і уніфікованих інтерфейсів, запропонована структура ПТЗ САР тиску забезпечує надійне та точне регулювання процесу шотування, запобігаючи небезпечному перевищенню тиску та підвищуючи безпеку експлуатації обладнання.

2.2.5 Схема структурна надійності реалізації управляючої функції САР

Для забезпечення високої надійності реалізації управляючої функції системи автоматичного регулювання тиску в автоклаві передбачено комплекс технічних і програмних рішень. У структурі регульовально-виконавчого каналу застосовано перевірені промислові компоненти з відповідними

характеристиками надійності, а також реалізовано заходи функціонального резервування, контролю справності та аварійного реагування (Рисунок 2.13).

Компоненти, що впливають на надійність:

- **Датчик тиску SITRANS P** має вбудовану самодіагностику, індикацію стану та стабільність вихідного сигналу при довготривалій експлуатації. Він сертифікований для застосування у складних промислових умовах.
- **Модуль аналогового вводу IB IL AI 4/I-PAC** підтримує перевірку лінії на наявність обриву сигналу або короткого замикання, що дозволяє виявляти несправності у з'єднанні з датчиком.
- **Програмований логічний контролер Phoenix Contact ILC 131** реалізує програмні механізми обробки виняткових ситуацій, таких як:
 - перевірка діапазону сигналу з датчика,
 - автоматичний перехід у безпечний стан при втраті зв'язку або перевищенні граничних значень,
 - блокування вихідного сигналу при виявленні помилок.
- **Модуль аналогового виходу IB IL AO 4/U-PAC** має функцію діагностики стану лінії, що дозволяє уникати неправильного спрацювання виконавчого механізму у разі відмови.
- **Електропривідний регулюючий клапан скиду води** підключається через захищене коло з електричним захистом по струму і напрузі. У разі втрати керуючого сигналу клапан автоматично переходить у попередньо визначене положення (відкрите), що дозволяє знизити тиск у системі.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

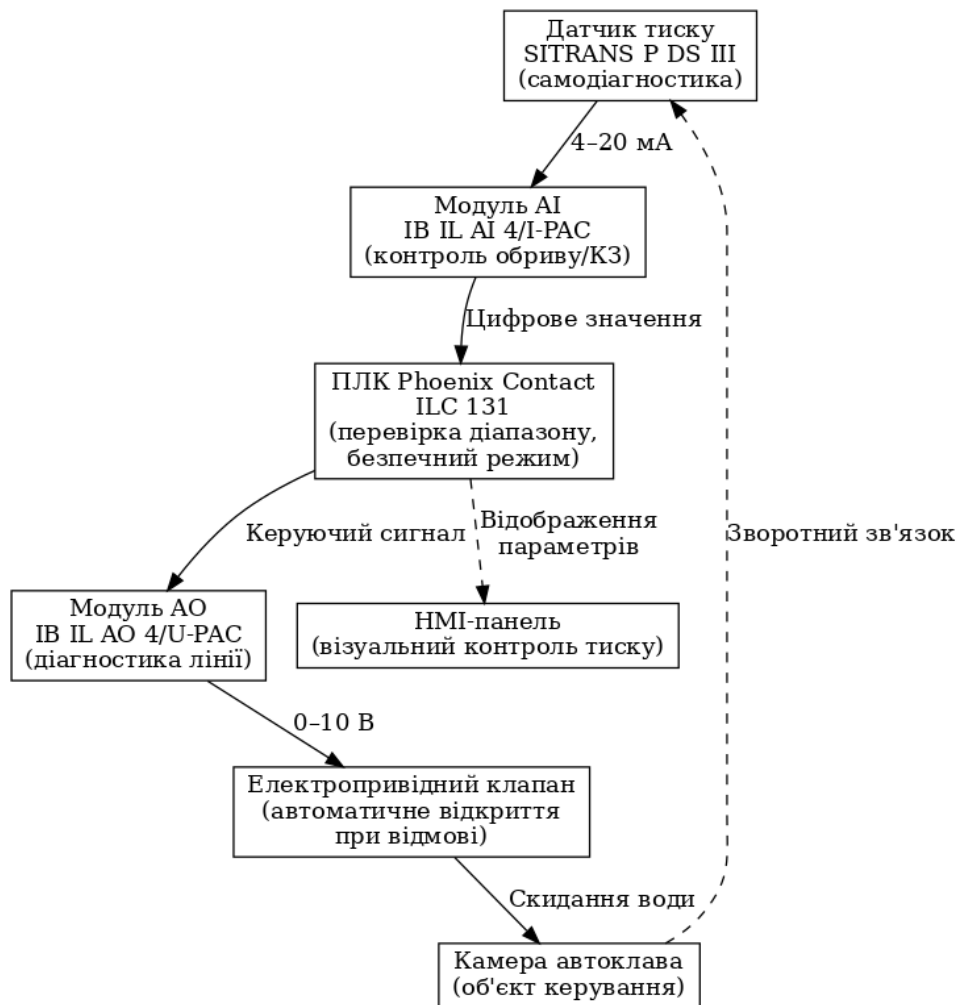


Рисунок 2.13 Схема структурна надійності реалізації управляючої функції CAP

Застосування зазначених технічних засобів та програмно-апаратних рішень дозволяє забезпечити відмовостійкість системи, своєчасне виявлення несправностей та безпечне завершення технологічного процесу у разі виникнення аварійної ситуації.

2.2.6 Розрахунок надійності реалізації управляючої функції CAP

Управляюча функція: автоматичне регулювання тиску в автоклаві шляхом відкривання електропривідного клапана скиду води.

Вимоги до надійності

Управляюча функція є критичною для забезпечення безпеки роботи автоклава. Надійність її реалізації має гарантувати:

- безвідмовну роботу протягом тривалого періоду експлуатації (не менше 1 року);
- швидке виявлення та реакцію на збої;

Перелік елементів РВК САР тиску

- Датчик тиску – SITRANS P DS III, середній час напрацювання на відмову:
 $T_1 = 150\,000$ год
- Модуль аналогового входу – IB IL AI 4/I-PAC, $T_2 = 120\,000$ год
- ПЛК – Phoenix Contact ILC 131, $T_3 = 100\,000$ год
- Модуль аналогового виходу – IB IL AO 4/U-PAC, $T_4 = 120\,000$ год
- Електропривід клапана – BELIMO M7410E, $T_5 = 80\,000$ год

Розрахунок інтенсивностей відмов

Інтенсивність відмов обчислюється як:

$$\lambda_i = 1 / T_i$$

Тоді:

$$\lambda_1 = 6.67 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_2 = 8.33 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_3 = 1.00 \times 10^{-5}$$

$$\lambda_4 = 8.33 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_5 = 1.25 \times 10^{-5}$$

Загальна інтенсивність відмов РВК:

$$\lambda_{\text{заг}} = \sum \lambda_i = 4.58 \times 10^{-5} \text{ 1/год}$$

Середній час напрацювання на відмову:

$$T_{\text{серед}} = 1 / \lambda_{\text{заг}} \approx 21\,834 \text{ год} \approx 2.5 \text{ роки}$$

Імовірність безвідмовної роботи за 1 рік:

$$P(t) = e^{(-\lambda_{\text{заг}} \times t)} = e^{(-4.58 \times 10^{-5} \times 8760)} \approx 0.670$$

Середній час відновлення (MTTR):

$$T_{\text{відновл}} = 12 \text{ год}$$

Розрахунки показують, що імовірність безвідмовної роботи РВК протягом року становить близько 67%, що є прийнятним рівнем для системи середньої критичності. Обрані компоненти відповідають вимогам промислової експлуатації.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.7 Ідентифікація об'єкта управління

Ідентифікація об'єкта управління (ОУ) – це процес визначення математичної моделі технологічного об'єкта на основі експериментальних або експлуатаційних даних. Мета ідентифікації полягає у встановленні параметрів передавальної функції, яка описує динамічні властивості регульованого об'єкта, зокрема об'єкта регулювання температури в автоклаві [4].

Мета ідентифікації

Метою ідентифікації є побудова лінеаризованої передавальної функції об'єкта регулювання, яка використовується в подальшому для:

- аналітичного налаштування параметрів регулятора (K_p , T_i , T_d);
- моделювання реакції системи;
- оцінки впливу збурень;
- вибору типу регулятора.

Метод ідентифікації

Розглянемо контур регулювання температури в автоклаві. Для цього проаналізуємо розгінну характеристику (Рисунок 2.14) та на її основі розглянемо перехідну характеристику контуру регулювання температури (Рисунок 2.15).

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

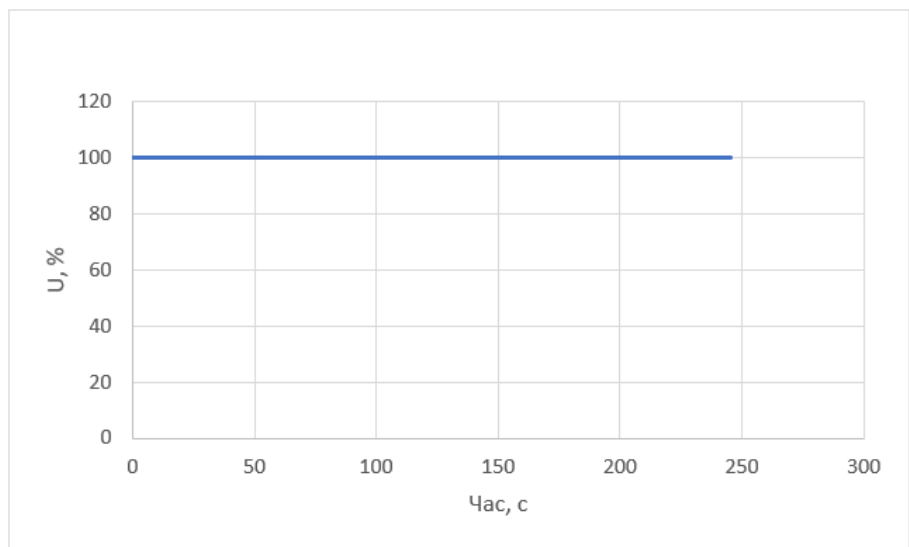
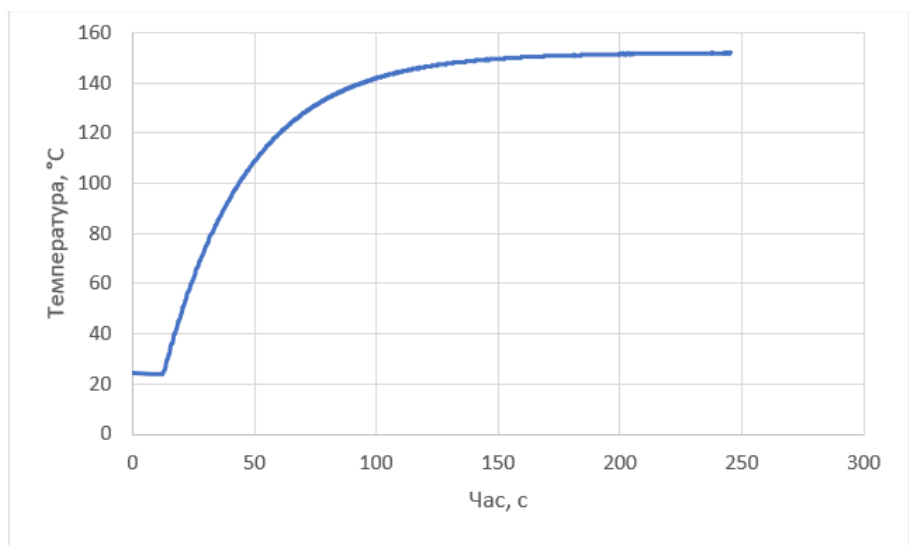


Рисунок 2.14 – Розгінна характеристика

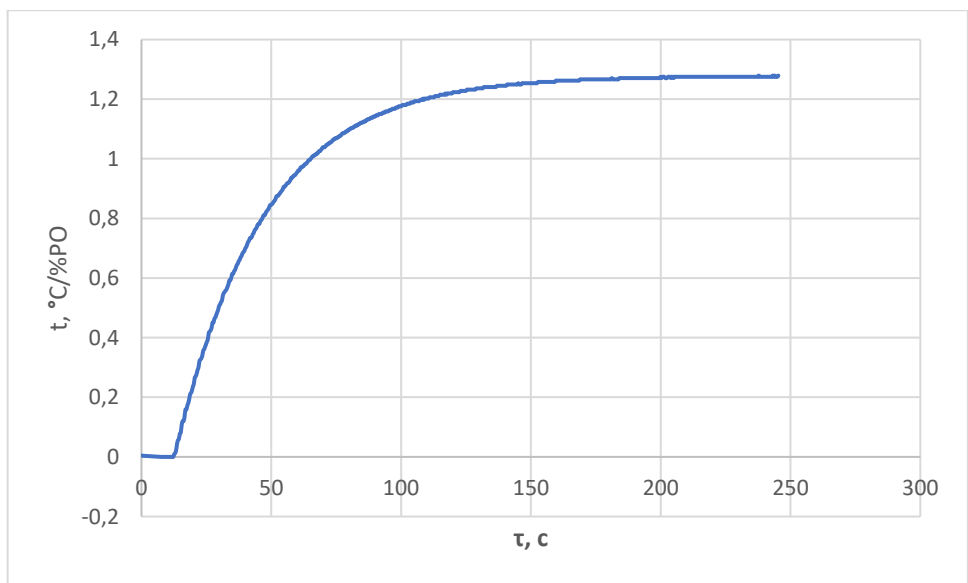


Рисунок 2.15 – Перехідна характеристика контуру регулювання температури автоклава

На основі наведеної перехідної характеристики (Рисунок 2.15), можна зробити висновки про динаміку системи регулювання температури автоклава: Вихідна величина плавно наближається до сталого значення, без коливань, перерегулювання відсутнє, характеристика має аперіодичну форму.

Найкраще підійде аперіодична ланка першого порядку.

$$W_o(s) = \frac{K}{Ts + 1} \cdot e^{-s\tau}$$

де:

- K — коефіцієнт підсилення об'єкта;
- T — стала часу об'єкта.
- τ — запізнення.

Побудова моделі

На основі графіка встановлено (Рисунок 2.15):

Стала часу $T = 40$ с — час до досягнення 63% від усталеного значення температури.

Підсилення $K = 1,28$ *C/%PO — співвідношення між зміною температури й величиною дії.

Запізнення $\tau = 10$ с — відображає інерційність об'єкта при реакції на керуючий сигнал.

$$W_{об}(s) = \frac{1,28}{40s + 1} e^{-10s}$$

Висновки

У ході ідентифікації об'єкта регулювання температури автоклава було побудовано спрощену лінеаризовану модель об'єкта у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з запізненням. На підставі аналізу перехідної характеристики (Рисунок 2.15) встановлено, що система демонструє аперіодичну поведінку без перерегулювання і коливань, що свідчить про наявність інерційної динаміки.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Побудована модель використовується для подальшого синтезу ПД-регулятора, моделювання реакції замкненої системи, а також для оцінювання стійкості й якості регулювання в умовах впливу збурень.

2.2.8 Розрахунок регуляторів САР

Вимоги до якості регулювання

Для системи автоматичного регулювання температури автоклава, яка реалізує процес шотування (термічної стерилізації під тиском), встановлюються такі вимоги до якості перехідного процесу [1]:

- Тип перехідного процесу: Аперіодичний. Обумовлено необхідністю виключити коливання температури, що можуть порушити стерильність або пошкодити консервовану продукцію.
- Перерегулювання: 0 %. Допуск на перерегулювання відсутній. Підвищення температури навіть на 1–2 °С понад задану може спричинити зміни в текстурі продукту, втрату смакових властивостей або розгерметизацію тари через надлишковий тиск.
- Час регулювання: Не більше 120 секунд (3 постійних часу об'єкта). Такий час дозволяє швидко вийти на уставку при запуску циклу та не затримує весь виробничий процес.
- Статична похибка: 0 %.

Вибір типу регулятора

З урахуванням характеру об'єкта керування (температура в автоклаві), вимог до якості регулювання (нульове перерегулювання, аперіодичність, відсутність коливань), а також особливостей самої технології, доцільно застосувати ПД-регулятор.

Метод налаштування

Для теплових об'єктів, рекомендовано використовувати метод мінімізації інтегралу квадрата помилки. Цей критерій дозволяє зменшити величину похибки за часом.

Використовується наступна цільова функція:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $e(t)$ — відхилення між уставкою та поточним значенням температури.

Розрахунок параметрів регулятора

Розрахунок T_i — інтегральна складова

Для аперіодичних об'єктів:

$$T_i = 3 \cdot T = 3 \cdot 40 = 120 \text{ с}$$

Інтегруюча дія необхідна для повного усунення сталої похибки.

Розрахунок T_d — диференціальна складова

Диференціювання використовується для випередження реакції об'єкта на збурення:

$$T_d = 0.5 \cdot T = 0.5 \cdot 40 = 20 \text{ с}$$

Розрахунок K_p — пропорційна складова

Базове формульне значення K_p за методом Куна-Худжеса для критерію ISE:

$$K_p = \frac{0.859}{K} \cdot \frac{T}{\tau}$$

$$K_p = \frac{0.859}{1.28} \cdot \frac{40}{10} = 0.671 \cdot 4 = 2.684$$

Передавальна функція з урахуванням значень

Підставивши всі параметри:

$$W_{PID}(s) = 2.684 \left(1 + \frac{1}{120s} + \frac{20s}{20s + 1} \right)$$

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

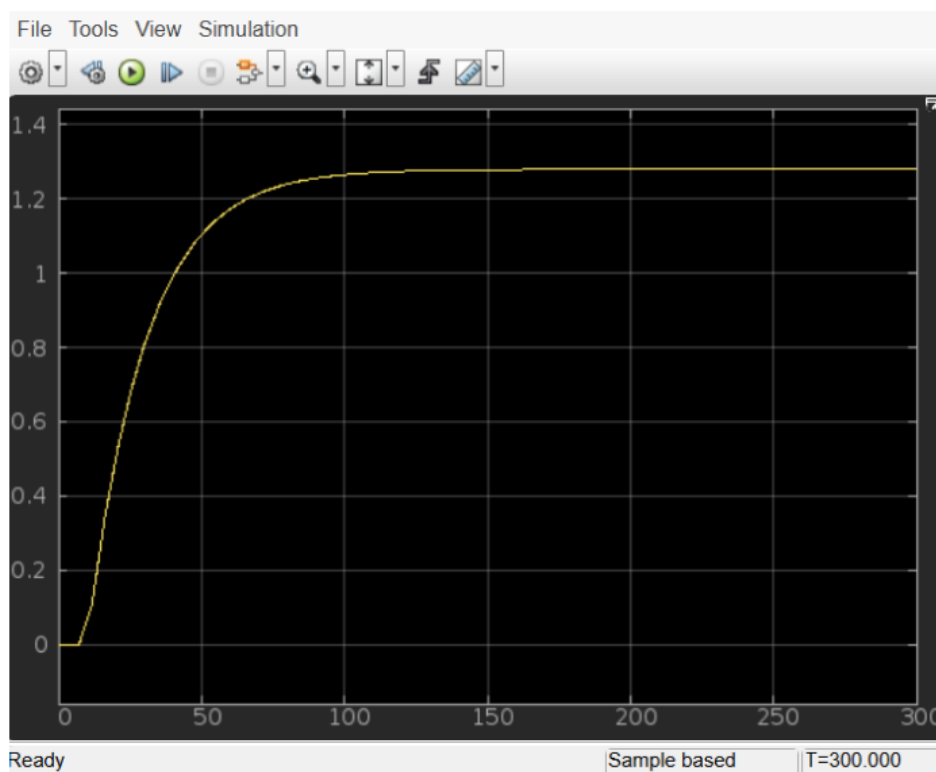


Рисунок 2.17 - Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

Таблиця 2.4 – Прямі показники якості по каналу «завдання–вихід»

Показник якості	Завдання-вихід
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0
Час перехідного процесу t , с	130
Ступінь затухання ψ	1.0
Перерегулювання σ , %	0

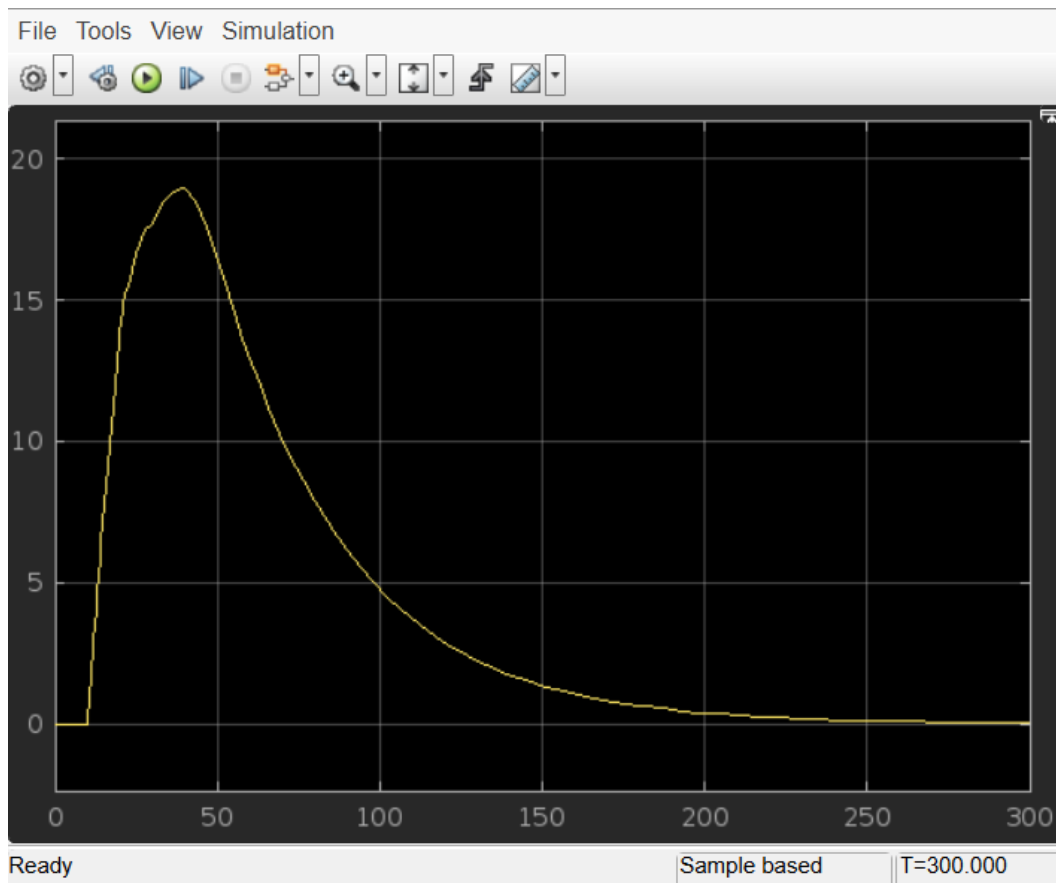


Рисунок 2.18 - Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 2.5 – Прямі показники якості по каналу «збурення – вихід»

Показник якості	Збурення -вихід
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0
Час перехідного процесу t , с	160
Ступінь затухання ψ	1.0
Перерегулювання σ , %	0

Метод РАФХ для контуру регулювання температури

За результатами ідентифікації (п. 2.2.7) контур регулювання температури автоклава описується передавальною функцією:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{1,28}{40s + 1} e^{-10s}$$

Частотна характеристика

Для частотного аналізу підставляємо $s = j\omega$:

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{об}(j\omega) = \frac{1.28}{1 + j40\omega} \cdot e^{-j10\omega}$$

Амплітуда:

$$|W(j\omega)| = \frac{1.28}{\sqrt{1 + (40\omega)^2}}$$

Фаза:

$$\angle W(j\omega) = -\arctan(40\omega) - 10$$

Передавальна функція ПІД-регулятора

$$W_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

У частотній області:

$$W_{PID}(j\omega) = K_p \left(1 + \frac{1}{j\omega T_i} + j\omega T_d \right)$$

Знаходимо частоту, на якій фаза незрегульованої системи прийнятна $\angle W_{об}(j\omega_c) \approx -135^\circ$.

Візьмемо при $\omega_c = 0.1$ рад/с:

$$\arctan(40 \cdot 0,1) = \arctan(4) \approx 76^\circ$$

$$10 \cdot 0,1 = 1 \text{ рад} \approx 57^\circ$$

$$\angle W(j0,1) = -76^\circ - 57^\circ \approx -133^\circ \Rightarrow \omega_c = 0.1 \text{ рад/с}$$

Обчислення модуля

$$|W(j0,1)| = \frac{1.28}{\sqrt{1 + (40 \cdot 0,1)^2}} = \frac{1.28}{\sqrt{17}} \approx 0.31$$

Щоб замкнена система мала одиничний модуль на цій частоті, регулятор має компенсувати:

$$|W_{PID}(j0,1)| \approx \frac{1}{0.31} \approx 3.23$$

Вибір параметрів регулятора

Щоб досягти бажаного модуля і фази, підбираємо:

$$K_p = 3$$

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_i = 80$$

$$T_d = 10$$

Побудуємо одноконтурну САР із налаштованими регуляторами

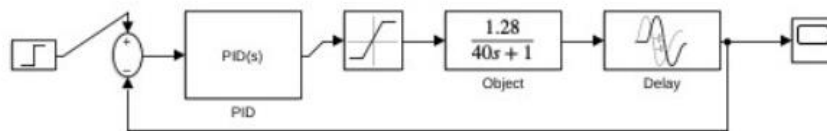


Рисунок 2.19 - Модель системи по каналі «завдання-вихід»

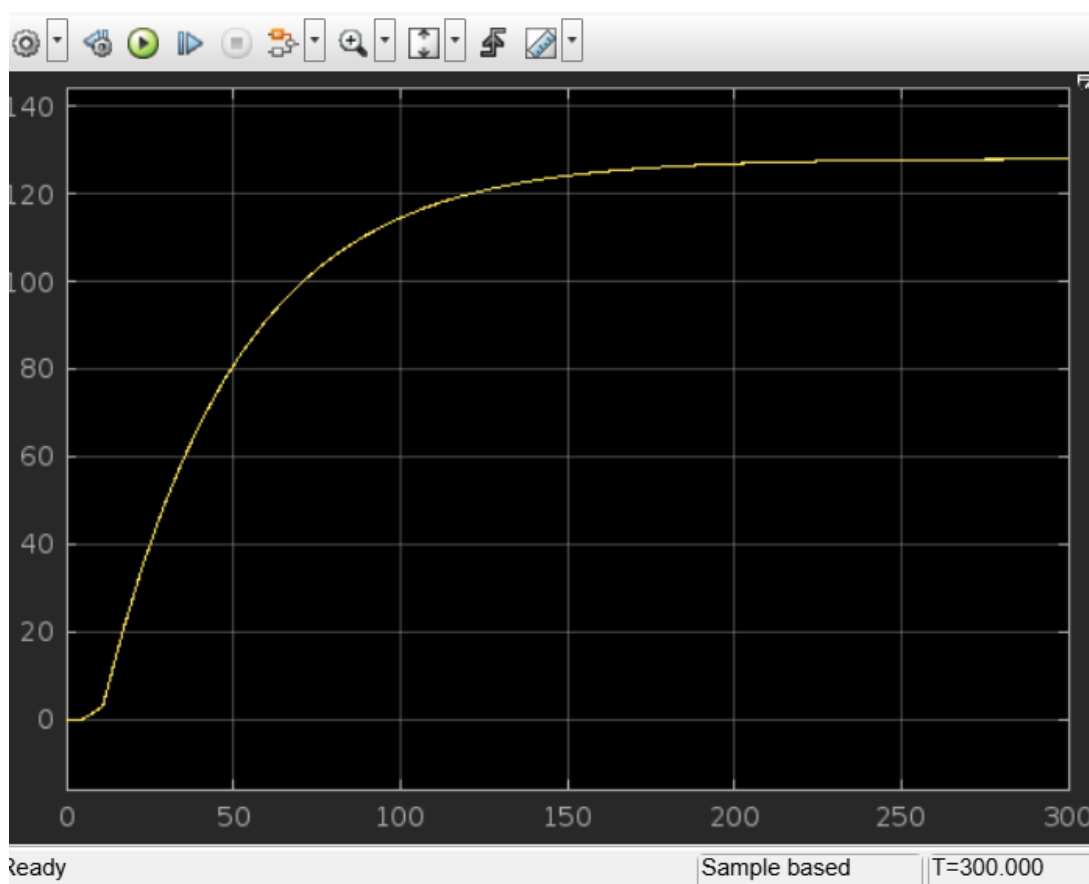


Рисунок 2.20 - Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

Таблиця 2.6 – Прямі показники якості по каналу «завдання-вихід»

Показник якості	Завдання-вихід
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0
Час перехідного процесу t , с	130

Ступінь затухання ψ	1.0
Перерегулювання σ , %	0

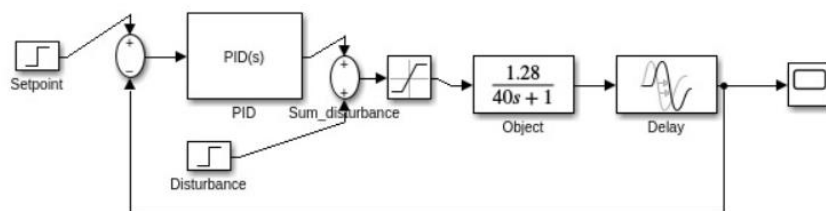


Рисунок 2.21 - Модель системи по каналі «збурення-вихід»

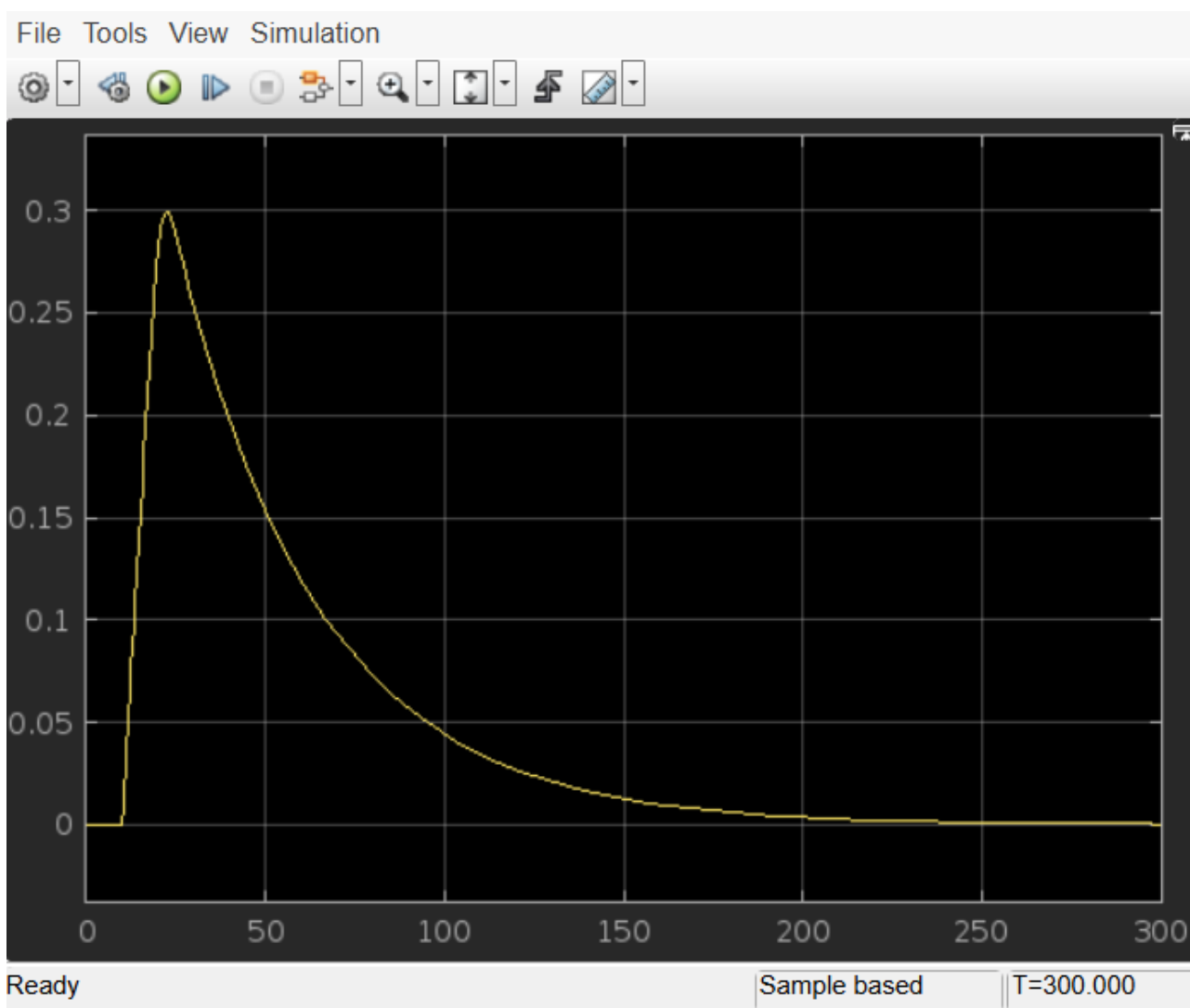


Рисунок 2.22 - Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 2.7 – Прямі показники якості по каналу «збурення –вихід»

Показник якості	Збурення -вихід
-----------------	-----------------

Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0
Час перехідного процесу t , с	140
Ступінь затухання ψ	1.0
Перерегулювання σ , %	0

Таблиця 2.8 - Порівняння прямих показників якості по каналу «завдання-вихід», знайдених за методом РАФХ та експрес-методом

Метод	РАФХ	Експрес-метод
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0	0
Час перехідного процесу t , с	130	110
Ступінь затухання ψ	1	1
Перерегулювання σ , %	0	0

Таблиця 2.9 - Порівняння прямих показників якості по каналу «збурення - вихід», знайдених за методом РАФХ та експрес-методом

Метод	РАФХ	Експрес-метод
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0	0
Час перехідного процесу t , с	140	160
Ступінь затухання ψ	1	1
Перерегулювання σ , %	0	0

На основі порівняльного аналізу прямих показників якості за методами РАФХ та експрес-методом для обох каналів — «завдання → вихід» та «збурення → вихід» — встановлено, що обидва методи забезпечують нульові значення статичної та динамічної похибок, повну відсутність перерегулювання та критичне (аперіодичне) затухання.

Проте експрес-метод забезпечує менший час перехідного процесу по каналу «завдання → вихід», що є важливою перевагою в умовах, коли швидке досягнення уставки має пріоритет над реакцією на зовнішні збурення. Саме цей канал є критично важливим для ефективності та стабільності процесу регулювання температури в автоклаві.

Таким чином, для подальшої реалізації та налаштування регулятора доцільно використовувати експрес-метод, оскільки він дозволяє скоротити час реакції системи на зміну завдання без погіршення інших якісних характеристик.

2.2.9 Функціональне моделювання САР

Функціональне моделювання системи автоматичного регулювання (САР) автоклава проведено з метою графічного відображення основних логічних зв'язків між елементами системи, що забезпечують регулювання технологічних параметрів. Для цього використано стандарт IDEF0, який дозволяє чітко розмежувати функціональні блоки, їх вхідні/вихідні параметри, керувальні впливи та необхідні ресурси [4].

Основна функція САР:

Забезпечення стабільного регулювання температури, тиску, рівня та витрати води в межах заданих параметрів у процесі стерилізації в автоклаві.

Контури, що моделюються:

- **Контур регулювання температури** — підтримка температури в межах $\pm 1^\circ\text{C}$ за допомогою ПІД-регулятора на основі даних з датчика температури.
- **Контур регулювання тиску** — контроль тиску у камері та скидання його надлишку шляхом відкриття електроклапана при перевищенні порогу.
- **Контур регулювання рівня води** — автоматичне дозаповнення камери водою до встановленого рівня.
- **Контур регулювання витрати води** — регулювання витрати води в охолоджувальній частині циклу для забезпечення ефективного охолодження.

Функціональна модель

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функціональне моделювання САР виконано у вигляді діаграми, яка дозволяє структуровано відобразити основні функції системи, їх входи, виходи, керуючі впливи та необхідні ресурси. Такий підхід забезпечує чітке розмежування функціональних обов'язків кожного підсистемного блоку у загальній структурі автоматизації (Рисунок 2.14).

Вхідні дані:

- Сигнали з первинних вимірювальних датчиків:
 - температура,
 - тиск,
 - рівень води,
 - витрата.
- Уставки (задані значення параметрів).
- Вибраний режим роботи системи.

Керуючі впливи:

- Алгоритми, реалізовані у ПЛК (включаючи ПД-регулювання).
- Програмна логіка аварійного відключення.
- Налаштування регуляторів і обробка подій.

Функціональні блоки:

- **F1** — обробка вимірювальної інформації (перетворення аналогових сигналів у цифрові, фільтрація, масштабування).
- **F2** — виконання ПД-регулювання температури.
- **F3** — регулювання тиску в камері автоклава.
- **F4** — керування подачею та витратою води під час охолодження.
- **F5** — реакція на аварійні ситуації (виявлення перевищення порогів, блокування роботи, запуск сигналізації).

Вихідні сигнали:

- Сигнали на електронагрівальний елемент.
- Сигнали на електродклапани подачі та скидання води/пари.
- Активація сигнальної арматури (візуальна/звукова індикація).

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Передача даних до SCADA-системи для архівації, візуалізації та віддаленого контролю.

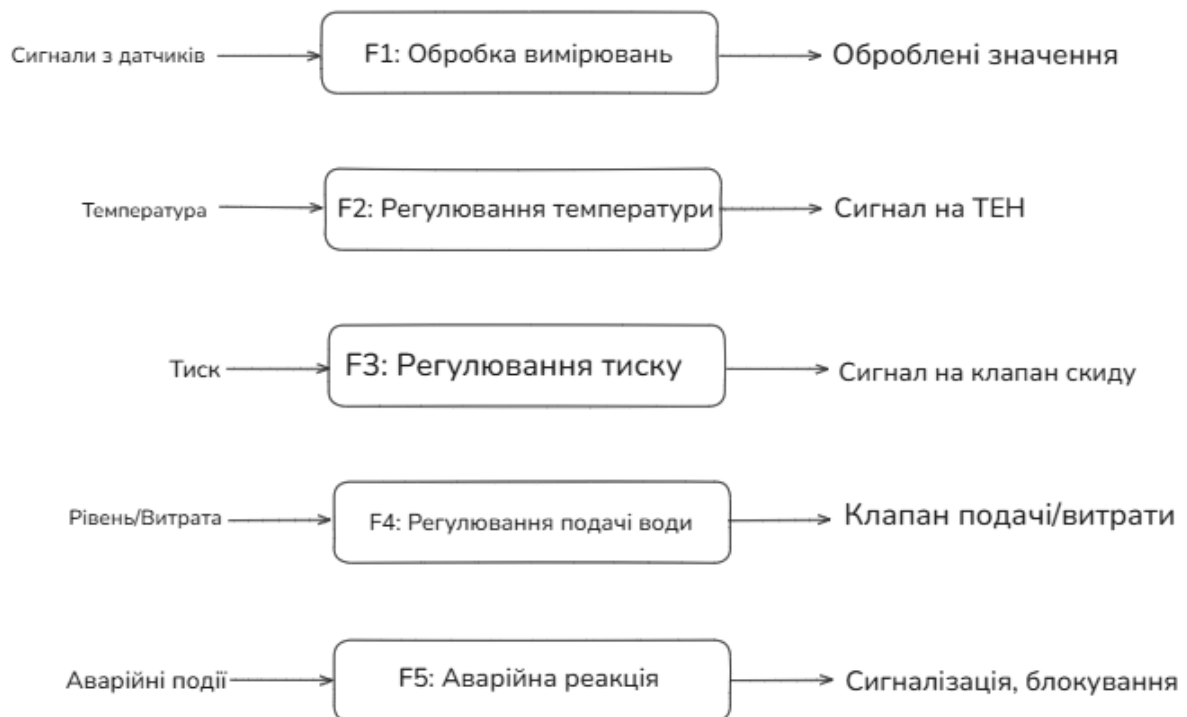


Рисунок 2.23 Функціональне моделювання САР

2.2.10 Висновки щодо роботоздатності РВК САР

На основі аналізу структурної побудови, принципу дії, а також функціонального моделювання системи автоматичного регулювання (САР) автоклава можна зробити висновок, що розроблена регулююча вимірювальна система (РВК) є працездатною та ефективною для реалізації у складі стерилізаційної установки.

САР забезпечує безперервне автоматичне регулювання технологічних параметрів, зокрема температури, тиску, рівня та витрати води. Кожен з контурів регулювання побудовано із урахуванням динамічних властивостей об'єкта та оснащено відповідними первинними перетворювачами, регулюючими органами та алгоритмами керування, реалізованими на базі ПЛК.

Проведене функціональне моделювання в дозволило формалізувати структуру САР, визначити логіку взаємодії між функціональними блоками, вхідними сигналами та виконавчими механізмами. Побудована модель

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

демонструє повну узгодженість між логікою роботи програмного забезпечення, технічним забезпеченням та вимогами до регулювання процесу.

Усі передбачені режими роботи системи автоматизації, зокрема нормальний, аварійний та режим самодіагностики, підтверджують здатність РВК забезпечити:

- стабільність регулювання при наявності збурень;
- швидкодію в межах допустимого часу спрацювання;
- надійність у випадку відмов окремих елементів;
- розширення функціональності за рахунок SCADA-інтеграції.

Отже, роботоздатність РВК САР підтверджена з позиції виконання основних технічних функцій автоматизованого управління процесом стерилізації в автоклаві, що дозволяє рекомендувати її до практичного впровадження.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 ОПИС ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЄКТУ

3.1 Схема функціональна автоматизації ТОУ

Опис схеми функціональної автоматизації ТОУ наведений в підрозділі 1.5 даної ПЗ [1].

3.2 Схема структурна ПТК

Опис схеми структурної ПТКЗА наведений в підрозділі 1.6 даної ПЗ [1].

3.3 Схема принципова електрична АСР

Схема принципова електрична зображена в документі " ТА–11388.0013.003.АТХ.Е".

Принципова електрична схема автоматизованої системи регулювання автоклава відображає підключення всіх основних елементів: давачів, виконавчих механізмів, ПЛК, джерел живлення та сигнальних пристроїв [1].

1. Блоки живлення

GB1 — Акумуляторна батарея Kraft PSU-2425LED на 24 В. Забезпечує стабільне живлення всіх елементів керування, зокрема ПЛК та виконавчої апаратури.

QF1 — Автоматичний вимикач Schneider Electric RESI9 на 16 А. Захищає ланцюги від перевантаження та короткого замикання.

2. Підключення давачів

- D1 — Витратомір Promag 53 (4–20 мА)
- D2 — Ультразвуковий рівнемір Siemens LU240 (4–20 мА)
- D3 — Датчик температури Sensit PTK 120-120 (4–20 мА)
- D4 — Датчик тиску Siemens SITRANS P DS III (4–20 мА)

Усі давачі підключаються до аналогових входів модуля АІ контролера через клеми: сигнали типу 4–20 мА передаються по провідникам 2-жильними екранированными кабелями. Враховано полярність та живлення +24 В через шину V+/V-.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Підключення виконавчої апаратури

A2, A3 — Електроприводи клапанів Resideo M7410E/BELIMO, керовані аналоговими сигналами 0–10 В через аналогові виходи АО контролера.

HL1 — Сигнальна лампа аварії AD22E-12DS 24В, підключена до одного з дискретних виходів DO ПЛК. Вона сигналізує про перевищення допустимого тиску або температури.

4. Призначення елементів схеми

A1 — Програмований логічний контролер Phoenix Contact ILC 131 ETH (8 DI, 4 DO, AO/AI – через модулі розширення). Реалізує ПД-регулювання, блокування та аварійний захист.

D1–D4 — Засоби вимірювання основних технологічних параметрів: витрати, рівня, температури, тиску.

A2–A3 — Виконавчі механізми – електроприводи регулюючих клапанів.

HL1 — Світлова індикація критичного стану.

5. Проходження сигналу

Сигнал від датчика температури D3 (4–20 мА) надходить на аналоговий вхід AI контролера A1. В контролері реалізується алгоритм ПД-регулювання, який формує сигнал 0–10 В на аналоговий вихід АО, що керує приводом клапана (A2) для регулювання нагріву. Аналогічно реалізовано інші контури (тиску, витрати, рівня).

Типи сигналів:

- Аналогові: 4–20 мА (вхід), 0–10 В (вихід)
- Дискретні: 24 В DC (DO, DI)

6. Режими управління

Реалізовані наступні режими:

Автоматичний — регулювання за ПД-алгоритмом відповідно до уставок.

Напіваавтоматичний — ручна установка параметрів, але автоматичне виконання керування.

Ручний — керування виконувальними механізмами через HMI-панель вручну (режим передбачено в SCADA-системі WebStudio).

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Креслення загального виду щита

Креслення загального виду щита автоматизації (номер документа: ТА-11388.0013.004.АТХ.Щ1) демонструє компонування апаратури керування всередині електротехнічного щита, призначеного для встановлення та підключення ПЛК, модулів живлення, автоматів захисту, сигнальної арматури та клемників.

1. Принцип і порядок монтажу апаратури на щиті

Усі елементи щита закріплюються на стандартних **DIN-рейках** (позиції В1–В4), що забезпечує модульність, простоту монтажу та демонтажу. Основні модулі (ПЛК, блок живлення, автомат) розташовані зліва направо у верхній частині монтажної панелі:

- **A1 (ПЛК Phoenix Contact)** – встановлений на DIN-рейці В1;
- **GB1 (блок живлення 24В)** – змонтований поряд із ПЛК;
- **QF1 (автоматичний вимикач)** – розміщений ліворуч на вході живлення;
- **HL1 (сигнальна лампа аварії)** – встановлена на фасаді щита з написом «Перевищення тиску в автоклаві».

Для зручності прокладання проводів передбачено **кабельні коробки DR1–DR3**, розміщені по вертикалі і горизонталі монтажної панелі.

2. Ергономічні вимоги до розташування апаратури

- Елементи керування та індикації розміщені **в зоні прямої видимості оператора** (на фасаді щита), що забезпечує зручність візуального контролю параметрів і швидке реагування на аварійні ситуації.
- Всі елементи з напругою 220 В змонтовані у верхній частині щита, на безпечній відстані від елементів низьковольтної частини (24 В), що зменшує ризик електромагнітних завад та забезпечує електробезпеку.
- Внутрішнє компонування дотримується логіки сигналопотoku: зліва направо – від джерела живлення до керованих елементів.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Ергономічні вимоги до розташування клемників

- Клемник ХТ1 змонтований у нижній частині щита, що дозволяє організувати зручне підключення зовнішніх кабелів та мінімізувати перехрещення провідників усередині щита.
- Клеми підписані відповідно до позначень на електричній схемі, що спрощує монтаж, обслуговування та діагностику.
- Висота розміщення клем забезпечує легкий доступ до них як при монтажі, так і в процесі експлуатації.

3.5 Схема монтажна щита (таблиця з'єднань)

Схема монтажна щита зображена в документі "ТА–11388.0013.002.АТХ.Щ2".

Призначення монтажної схеми щита

Монтажна схема щита автоматизації призначена для деталізації електричних з'єднань між усіма компонентами системи автоматизації, що розміщені в межах щита: ПЛК, блоків живлення, автоматичних вимикачів, клемників, сигнальних пристроїв тощо.

Головною метою цієї схеми є забезпечення:

- логічного і зручного прокладання проводів;
- ідентифікації точок підключення;
- зменшення помилок при монтажі та обслуговуванні;
- відповідності фактичного монтажу до принципової електричної схеми.

Опис схеми монтажної щита

Схема містить топологічне розміщення всіх елементів у межах монтажної панелі щита, з прив'язкою до координат, і табличну частину з переліком дротів і з'єднань.

1. Структура схеми

- Умовно відображено місця встановлення: автомат QF1, блок живлення GB1, ПЛК А1, клемник ХТ1, сигнальна лампа HL1.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Пронумеровані всі точки підключення: аналогові входи (AI), дискретні виходи (DO), клеми живлення (V+/V-, N, PE).

2. Таблиця з'єднань

У таблиці вказано:

- Позначення провідників (W1, W2, ... W7);
- Початкові і кінцеві точки підключення;
- Тип проводу;
- Кількість дротів та їх довжина;
- Наявність перемичок, наконечників ОКМ, які забезпечують зручність обслуговування.

3. Візуальні прив'язки

На схемі вказані всі клеми клемника ХТ1 з номерами, що дозволяє чітко орієнтуватися при зовнішньому підключенні давачів та виконавчих механізмів.

3.6 Схеми зовнішніх з'єднань

Призначення схеми зовнішніх з'єднань

Схема зовнішніх з'єднань (зображена в документі "ТА-11388.0013.004.АТХ.М") є невід'ємною частиною проєктної документації і призначена для опису фізичних підключень між щитом автоматизації та зовнішніми пристроями: вимірювальними приладами, виконавчими механізмами, силовими кабелями живлення, контрольними лініями.

Склад і опис схеми зовнішніх з'єднань

Схема містить як графічну частину (зображення ліній зв'язку), так і табличну частину з переліком елементів, типів кабелів, місць встановлення та середовища експлуатації.

Підключення вимірювальних пристроїв:

D1 – Витратомір

- Тип: Endress+Hauser Promag 53
- Місце встановлення: трубопровід, витрата води
- Підключення через контрольний кабель КВВГ 5×1.0 мм² (W2)

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

D2 – Ультразвуковий рівнемір

- Тип: Siemens SITRANS Probe LU240
- Місце встановлення: автоклав, рівень води
- Підключення через W3 (КВВГ 4×1.0 мм²)

D3 – Датчик температури

- Тип: Sensit PTK 120-120
- Місце встановлення: автоклав, температура води
- Підключення через W4 (КВВГ 4×1.0 мм²)

D4 – Датчик тиску

- Тип: Siemens SITRANS P DS III
- Місце встановлення: автоклав, тиск пари
- Підключення через W5 (КВВГ 4×1.0 мм²)

Підключення виконавчих механізмів:

A2, A3 – Електроприводи клапанів

- Тип: Resideo M7410E / BELIMO
- Місце встановлення: трубопроводи (позиції 1в, 2в)
- Підключення через W6/W7 (КВВГ 4×1.0 мм²)
- Сигнали керування: аналогові (0–10 В), живлення 24 В

Живлення щита автоматизації:

W1 – Кабель силовий живлення

- Тип: ВВГ 3×1.5 мм²
- Призначення: живлення щита від електрощита підприємства.
-

3.7 Специфікація обладнання

У даному підрозділі наведено характеристику вендорів і постачальників, які забезпечують ключові компоненти автоматизованої системи керування автоклавом: вимірювальну апаратуру, виконавчі пристрої, програмно-технічні засоби та комплектуючі.

1. Вимірювальна апаратура

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Endress+Hauser – Швейцарія

Виробник витратоміра Promag 53, що забезпечує точне вимірювання витрати з аналоговим виходом 4–20 мА.

Посилання на сайт виробника: (<https://www.endress.com>)

Siemens – Німеччина

Постачальник ультразвукового рівнеміра SITRANS Probe LU240 та датчика тиску SITRANS P DS III. Надійні пристрої промислового класу з підтримкою аналогових інтерфейсів.

Посилання на сайт виробника: (<https://www.siemens.com>)

Sensit – Чехія

Виробник температурного датчика РТК 120-120. Спеціалізується на промислових датчиках температури для важких умов експлуатації.

Посилання на сайт виробника: (<https://www.sensit.cz/en>)

2. Виконавча апаратура

BELIMO – Швейцарія

Світовий лідер у виробництві приводів для клапанів. У проєкті застосовано виконавчі механізми серії M7410E.

Посилання на сайт виробника: (<https://www.belimo.com>)

Resideo – США

Раніше частина Honeywell. Надійний виробник електроприводів з живленням 24 В.

Посилання на сайт виробника: (<https://www.resideo.com>)

3. Програмно-технічні засоби автоматизації

Phoenix Contact – Німеччина

Виробник програмованих логічних контролерів (ПЛК) ILC 131 ETH та модулів аналогових входів/виходів IB IL AI 4/I-PAC і IB IL AO 4/U-PAC. Надійні рішення для промислових систем управління.

Посилання на сайт виробника: (<https://www.phoenixcontact.com>)

4. Сигнальна та монтажна апаратура

АСКО-УкрЕм – Україна

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Постачальник сигнальної арматури (AD22E-12DS), клемників, DIN-рейок.
Локальний виробник електромонтажної продукції.

Посилання на сайт виробника: (<https://asko.ua>)

Schneider Electric – Франція

Виробник автоматичних вимикачів (RESI9) та кабельних коробів
ЕТК40316. Продукція сертифікована відповідно до міжнародних стандартів.

Посилання на сайт виробника: (<https://www.se.com>)

ENEXT – Китай

Постачальник щитів автоматизації, що відповідають IP41. Модель:
e.mbox.industrial.p.80.60.30z.

Посилання на сайт виробника: (<https://enext.ua>)

5. Кабельно-провідникова продукція

ЗЗКМ (Запорізький завод кольорових металів) – Україна

Постачальник силових і контрольних кабелів марок ВВГ, КВВГ, ПВ1,
ПВ4.

Посилання на сайт виробника: (<https://zzkm.ua>)

Dupont – Китай

Постачальник монтажних перемичок типу Dupont М-М. Застосовуються
для з'єднань у логічних схемах та прототипуванні.

6. Наявність дистрибуторів в Україні

Більшість наведеного обладнання доступна в Україні через офіційних
представників і дистрибуторів:

- Endress+Hauser Україна — <https://www.ua.endress.com>
- Siemens Україна — <https://www.siemens.ua>
- Phoenix Contact Україна — <https://www.phoenixcontact.ua>
- Schneider Electric Україна — <https://www.se.com/ua>
- АСКО-УкрЕм — локальний виробник і постачальник

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМУВАННЯ ПТКЗА

У даному розділі розглянуто реалізацію програмного забезпечення програмно-технічного комплексу автоматизованої системи керування автоклавом. Програмування контролерного рівня виконано у середовищі CoDeSys, з використанням мови CFC, що забезпечує зручне візуальне конструювання логіки керування. Супервізорний рівень візуалізовано за допомогою SCADA-системи WebStudio, яка забезпечує моніторинг і архівацію параметрів процесу.

4.1 Програмування функціональності ПЛК

Програмне забезпечення для ПЛК Phoenix Contact реалізує логіку одноконтурного ПД-регулювання температури в автоклаві. Основна мета – підтримання температури шотування в визначених межах.

На основі сигналу з температурного датчика РТК 120-120, що подається на аналоговий вхід ПЛК, виконується обчислення похибки регулювання: різниці між уставкою та фактичним значенням температури. Обчислена похибка надходить у функціональний блок ПД-регулятора, який генерує керуючий вплив на електронагрівач (Рисунок 4.1).

У складі логіки передбачено механізм аварійного захисту: при перевищенні температури понад 135 °С формується сигнал аварії, який блокує роботу нагрівача (Рисунок 4.2). Аналогічно, при виявленні зниженого рівня води або перевищення тиску спрацьовують відповідні алгоритми захисту, реалізовані через логічні оператори в CFC мови LD (Рисунок 4.3).

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

1  PROGRAM PLC_MAT
2  VAR
3      PID_1: PID;                // регулятор температури автоклава
4      autoclave_Temp_Alarm: BOOL; // сигналізація перевищення температури автоклава
5      autoclave_Temp_PV: REAL := 0; // вимірне значення температури
6      autoclave_Temp_SV: REAL := 123; // уставка температури
7      autoclave_Temp_KP: REAL := 2.68; // налаштування П-частини регулятора
8      autoclave_Temp_TN: REAL := 120; // налаштування І-частини регулятора
9      autoclave_Temp_TV: REAL := 20; // налаштування Д-частини регулятора
10     autoclave_Temp_MIN: REAL := 0; // мінімальне значення температури
11     autoclave_Temp_MAX: REAL := 135; // максимальне значення температури
12     autoclave_Temp_CV: REAL; // сигнал управління регулятора
13 END_VAR

```

Рисунок 4.1 - Перелік змінних

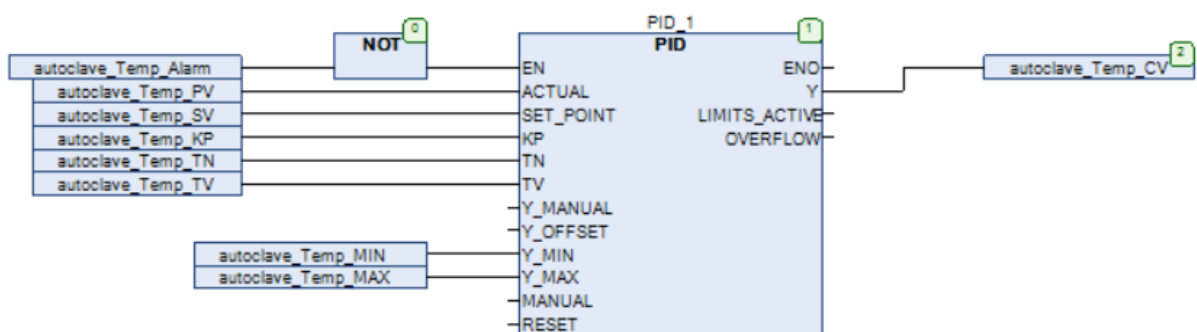


Рисунок 4.2 - Реалізація регулювання САР

Реалізація також враховує ручний режим керування, що активується у разі втрати зв'язку з датчиками або виникнення позаштатних ситуацій. У цьому режимі оператор має змогу впливати на роботу системи без автоматичного регулювання, що підвищує надійність експлуатації.



Рисунок 4.3 - Реалізація аварійної ситуації температури автоклава

4.2 Програмування функціональності SCADA-системи

Супервізорний рівень реалізовано у середовищі WebStudio. Створено мнемосхему автоклава, яка відображає основні контури: температуру, тиск,

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівень води та витрату. Кожен параметр має прив'язку до реального давача і виводиться на екран у вигляді цифрових індикаторів і графічних елементів.

Для кожного технологічного параметра реалізовано відображення:

- поточного значення;
- уставки (якщо передбачена зміна оператором);
- статусу аварій (за наявності перевищення меж);
- гісторії значень (трендів).

Обмін даними між ПЛК і SCADA забезпечується через OPC-сервер. Це дозволяє отримувати дані в реальному часі, реагувати на зміни технологічного процесу, а також здійснювати архівацію значень із подальшою можливістю перегляду.

У SCADA-інтерфейсі реалізовано:

- **панель керування** – для зміни режимів (автоматичний/ручний);
- **вікно аварій** – індикація і журнал подій;
- **вікно параметрів** – введення уставок, перегляд змінних;
- **тренди** – графічне представлення зміни значень температури, тиску, рівня тощо;
- **головна мнемосхема** – інтерактивна візуалізація стану всього автоклава (Рисунок 4.4).

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

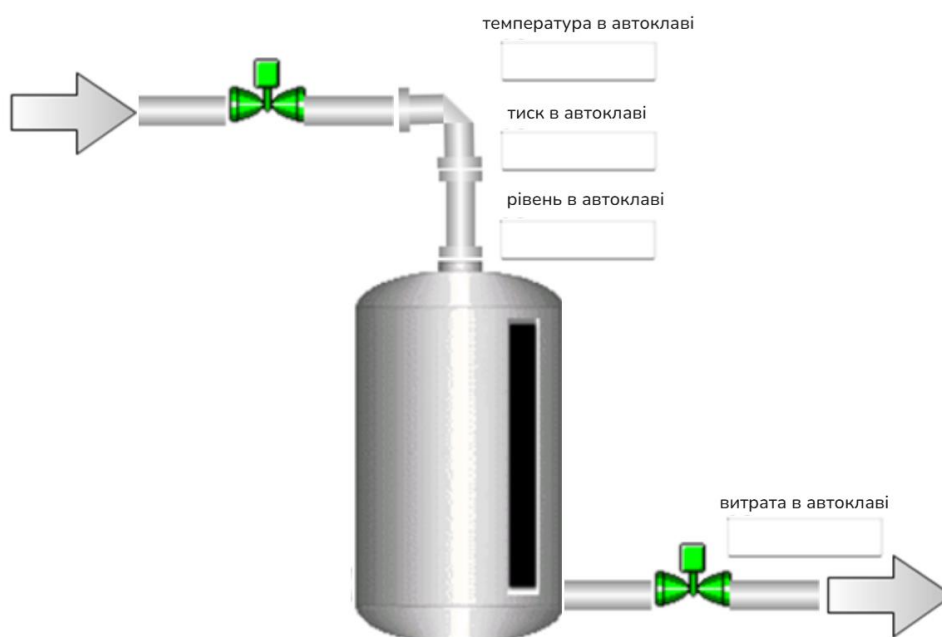


Рисунок 4.4 - Мнемосхема автоклава

РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АТК

У цьому розділі викладено процес віртуального випробування автоматизованого технологічного комплексу (АТК) для автоклава. Метою моделювання є перевірка роботоздатності розробленої системи керування до її фізичного впровадження. Для цього використано три програмні платформи: **Simulink** для створення моделі об'єкта управління, **CoDeSys** – для програмування логіки ПЛК, а також **WebStudio** – для реалізації HMI/SCADA-візуалізації.

5.1 Схема структури імітаційного моделювання АТК TOY

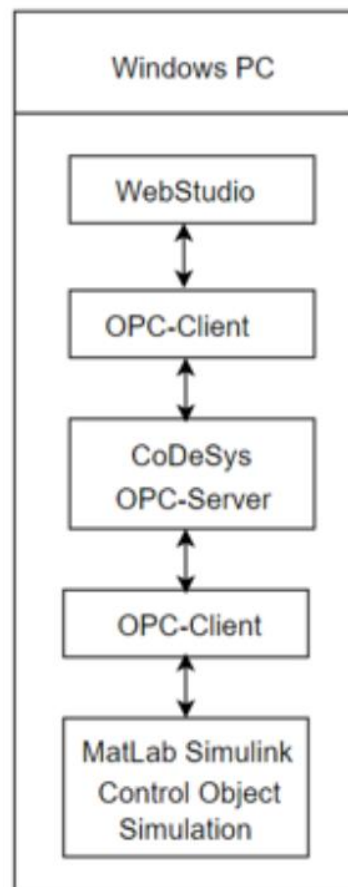


Рисунок 5.1 – Схема структурна імітаційного моделювання АТК

Імітаційне середовище реалізовано як взаємодія трьох рівнів:

- **Модель об'єкта** створено у Simulink (Matlab), де змодельовано зміну температури всередині автоклава залежно від вхідного впливу (нагріву).

- **Програмований логічний контролер (ПЛК)** реалізований у середовищі CoDeSys – саме тут сформовано ПІД-регулятор, логіку аварійного відключення та обробки сигналів.
- **HMI/SCADA-система** WebStudio відповідає за візуалізацію технологічного процесу, зокрема, мнемосхему, індикацію параметрів та повідомлення про помилки.

Ці компоненти взаємодіють між собою за допомогою OPC-сервера, що забезпечує двосторонній обмін даними в режимі реального часу.

5.2 Функціональне моделювання ОУ в СКМ MatLab Simulink

Для побудови моделі об'єкта управління використано Matlab/Simulink з підключенням бібліотеки OPC Toolbox. У моделі враховано інерційність нагрівального процесу, теплоємність середовища, збурення (наприклад, зміна початкової температури), а також затримку реакції на вхідний сигнал.

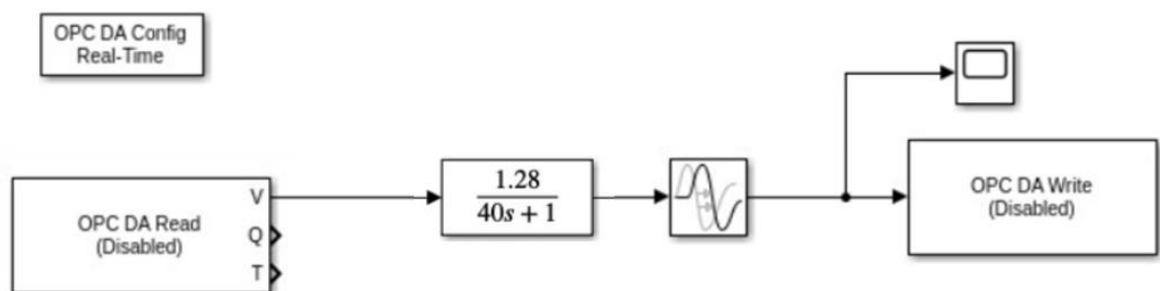


Рисунок 5.2 – Схема об'єкту керування в Matlab

5.3 Реалізація контролерної функціональності САР в софтПЛК CoDeSys

Реалізація програмного коду та функціональних можливостей контролера детально розглянута у підрозділі 4.1 даного дипломного проєкту.

5.4 Реалізація супервізорної HMI-Standard функціональності в HMI/SCADA-системі WebStudio

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спочатку у середовищі WebStudio було створено інтерфейсне вікно **Menus** (Рисунок 5.3), у якому реалізовано навігацію між основними сторінками проєкту. Перехід між ними доступний лише після авторизації в системі з обліковим записом Admin та введенням відповідного пароля.



Рисунок 5.3 – Вікно Menus у WebStudio

У вікні **Models** розміщено елементи взаємодії з головними змінними системи. Користувач має змогу переглядати та змінювати значення уставок, поточні значення технологічних параметрів, а також спостерігати за сигналами регулятора та дією на об'єкт з урахуванням збурень (Рисунок 5.4).

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

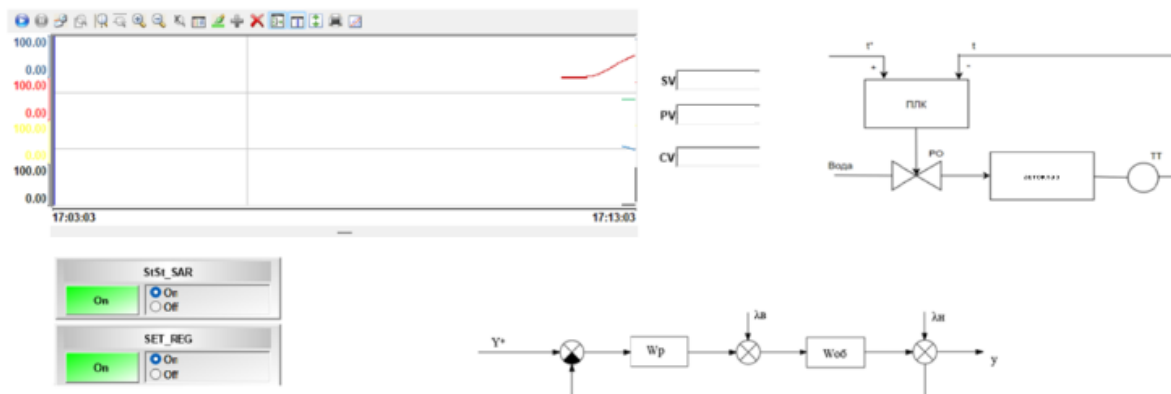


Рисунок 5.4 – Вікно Models у WebStudio

На Рисунку 5.5 подано вигляд вікна **Alarms**, яке відображає всі критичні стани, що виникають під час роботи системи. Інформація про події зберігається у журналі та доступна для перегляду при необхідності.

Alarm											
Tag Name	Message	Comment	Value	Event Time	Activation TL...	Tag Name	Message	Previous	Group	Comment	Type
Open_Screen1_alarm.acc			0	05/20/2025 23:21:46		Simulink.PV		56.364745	Group 001		Deviation
Open_Screen3_alarm.acc			0	05/20/2025 23:21:46		Simulink.PV		18.991362	Group 001		Lo
Open_Screen2_alarm.acc			0	05/20/2025 23:21:46		Simulink.PV		4.875127	Group 001		LoLo

Activation TL...	Tag Name	Comment	Value	Type	Group	State	Station
05/20/2025 23:20:51	Simulink.PV		0.000000	LoLo	Group 001	UNACK	LAPTOP-S
05/20/2025 23:20:51	Simulink.PV		0.000000	Deviation	Group 001	UNACK	LAPTOP-S
05/20/2025 23:20:51	Simulink.PV		0.000000	Lo	Group 001	UNACK	LAPTOP-S

Рисунок 5.5 – Вікно Alarms у WebStudio

У вікні **Mimics** (Рисунок 5.6) представлено мнемосхему, яка візуалізує основні елементи технологічного процесу. Це дозволяє оператору в режимі реального часу контролювати стан системи та оперативно реагувати на зміни параметрів.

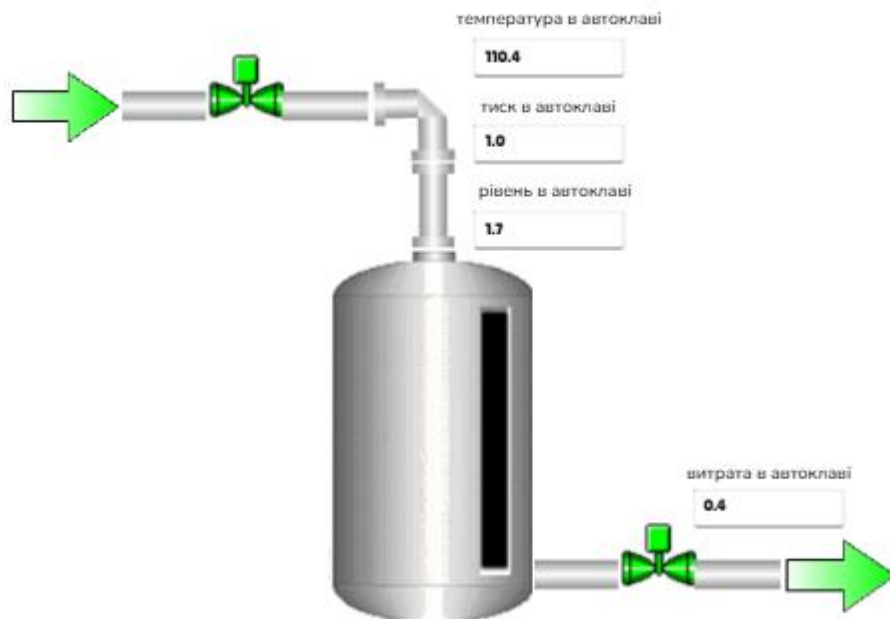


Рисунок 5.6 – Вікно Mimics у WebStudio

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це комплекс правових, соціально-економічних, санітарно-гігієнічних, технічних і профілактичних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці, збереження здоров'я і життя працівників у процесі трудової діяльності [5].

Експлуатація промислового обладнання із автоматизованими системами управління супроводжується потенційними ризиками отримання травм та професійних захворювань, пов'язаних з наявністю небезпечних та шкідливих виробничих факторів, таких, як підвищені температури та тиск, механічні впливи, пожежі, вибухи а також електричні небезпеки. Саме тому технічні та організаційні заходи з охорони праці є обов'язковими при проєктуванні та впровадженні таких систем [5].

Автоматизована система керування автоклавом, що є об'єктом дослідження в цьому дипломному проєкті, відноситься до технічно складних і потенційно небезпечних об'єктів. Автоклав працює під високим тиском і температурою. У процесі роботи можливі ризики опіків, ураження електричним струмом, вибуху пари та пожежі. Тому необхідно передбачити необхідні технічні та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного обладнання та засобів автоматизації щодо зниження цих ризиків, а також визначити основні вимоги з гігієни праці та виробничої санітарії, а також пожежної безпеки та профілактики.

6.1 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного устаткування та засобів автоматизації

6.1.1 Аналіз небезпек

До основних небезпечних і шкідливих факторів, що можуть виникати під час експлуатації технологічного устаткування та засобів автоматизації системи керування автоклавом, належать:

- висока температура робочого середовища;

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- надлишковий тиск пари;
- гарячі поверхні трубопроводів і корпусу;
- ураження електричним струмом (220 В і 24 В);
- відмова контролера або виконавчих механізмів;
- людський фактор при обслуговуванні;
- витік пари при пошкодженні ущільнень.

6.1.2 Технічні рішення та організаційні заходи

Для усунення або мінімізації вищезазначених ризиків передбачено:

- встановлення теплоізоляції на всіх елементах трубопроводів, що нагріваються;
- реалізація автоматичного обмеження температури і тиску на рівні ПЛК;
- використання обладнання з класом захисту корпусу не нижче IP54 (розподільчі коробки, шафи керування);
- застосування аварійного відключення живлення за допомогою кнопки "Стоп", виконаної згідно з ДСТУ EN ISO 13850:2018;
- впровадження резервного живлення для ПЛК на випадок відключення мережі;
- встановлення електрозахисних пристроїв — автоматичних вимикачів, реле струму витоку, УЗО;
- реалізація блокувань: запуск заборонений без води або при аварії на вході/виході;
- забезпечений необхідний рівень електромагнітної сумісності згідно вимог ДСТУ EN 55011:2017;
- виведення усіх критичних параметрів на SCADA-систему для моніторингу;
- використання панелі оператора з доступом за паролем для запобігання втручанням.

До передбачених організаційних заходів відносяться:

- допуск до обслуговування обладнання тільки кваліфікованого персоналу;

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- проведення вступного та періодичного інструктажів з охорони праці;
- ведення журналу обліку інструктажів;
- забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту (діелектричні рукавички, окуляри, спецодяг);
- розміщення плакатів та вказівників безпеки біля автоклава;
- регулярне технічне обслуговування та перевірка засобів автоматики відповідно до графіка.

6.1.3 Електробезпека

Передбачена проектом апаратура системи автоматизації та силове електротехнічне устаткування повинні експлуатуватися відповідно до паспортних даних, які визначають номінальні значення струмів і напруг живлення.

Для живлення засобів автоматизації використовується трифазна електромережа з заземленою нейтраллю, з робочою напругою 220/380 В та частотою 50 Гц. Використовується система захисного заземлення TN (підсистема TN-C-S).

Дана система захисного заземлення виключає можливість ураження персоналу електричним струмом при пробії на корпус ЕУ однієї з фаз електромережі, що забезпечується завдяки швидкому вимиканню ділянки електромережі, на якій виникло замикання однієї з фаз на корпус, за рахунок використання пристроїв максимального струмового захисту.

Для виконання діючих вимог з електробезпеки, все технологічне електроустаткування згідно з ДСТУ ІЕС 61140:2015 має І клас за електрозахистом, а засоби автоматизації (блоки контролерів, екранні пристрої, давачі, виконавчі пристрої, блоки живлення тощо) системи управління мають відповідно І, ІІ та ІІІ класи.

ЕУ мають затискачі заземлювальні та відповідні знаки заземлення. Значення опору між заземлювальним затискачем та кожною доступною до дотику металевою неструмовідною частиною ЕУ, яка може опинитися під напругою в разі пошкодження ізоляції, не повинно перевищувати 0,1 Ом.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для захисту людей від помилкових дій та випадкового дотику до струмовідних частин ЕУ при їх монтажі, обслуговуванні та експлуатації застосовані розподільні щити в металевих шафах в закритому виді, клемні колодки мають бути захищеними спеціальними щитками, електрокабелі мати різнокольорову ізоляцію провідників та відповідне кольорове маркування комутаційних елементів БЩУ, таблички та написи з позначенням робочих напруг, попереджувальні знаки.

Згідно ДСТУ 7237:2011 для забезпечення захисту від випадкового дотику людини до струмовідних частин ЕУ застосовують такі види захисту:

- основне (робоче) ізолювання струмовідних частин (захисне ізолювання);
- додаткове, посилене, подвійне ізолювання струмовідних частин;
- захисні оболонки;
- захисні огорожі (тимчасові або стаціонарні);
- безпечне розташування струмовідних частин;
- ізолювання робочого місця;
- мала напруга; захисне вимкнення;
- попереджувальна сигналізація (звукова, світлова тощо);
- блокування;
- встановлення знаків безпеки;
- електрозахисні засоби; засоби індивідуального захисту.

Для запобігання ураженню електричним струмом під час дотику до металевих нормально неструмовідних частин ЕУ, які можуть бути під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, застосовують окремо або в поєднанні такі види захисту:

- захисне заземлення;
- автоматичне вимкнення живлення;
- зрівнювання потенціалів;
- застосування обладнання відповідного класу за електрозахистом;
- захисний електричний поділ кіл;
- ізолювальні (непровідні) приміщення, зони, майданчики;

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- системи наднизької напруги (безпечної, захисної).

6.2 Гігієна праці та виробнича санітарія

Гігієнічні умови на робочому місці оператора автоклава значною мірою впливають на його працездатність, увагу та загальний стан здоров'я. При проектуванні автоматизованої системи керування було враховано вимоги встановлені в чинних нормативних документах щодо параметрів мікроклімату робочої зони, складу повітря, рівня шуму, вібрацій, виробничих випромінювань та освітлення [5].

6.2.1 Мікроклімат робочої зони

У робочому приміщенні підтримується температура в межах 19 – 23 °С у холодний період та 20–25 °С у теплий, відносна вологість — 40–60 %, швидкість повітря — не більше 0,1 м/с.

Ці параметри відповідають нормам ДСН 3.3.6.042-99. Для їх підтримки передбачено **припливно-витяжну вентиляцію** та вологозахисне оздоблення приміщення.

Період	t, °С	Вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	19–23	40–60	0,1
Теплий	20–25	40–60	0,1

6.2.2 Склад повітря робочої зони

У нормальних умовах експлуатації в повітря не надходять шкідливі речовини. У випадку витoku пари або аварійного підвищення тиску в автоклавi вмикається **аварійна витяжка**.

Періодично здійснюється контроль складу повітря на вміст вологи згідно з ДСТУ EN 482:2022.

6.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення робочої зони відповідає вимогам ДБН В.2.5-28:2018. Використовується комбіноване освітлення — природне та штучне:

- природне — через вікна площею не менше 1/8 площі підлоги;

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- штучне — за допомогою світильників типу ЛПО36 із люмінесцентними лампами та герметичним виконанням (IP65);
- рівень освітленості на робочому місці; не менше 300 лк.

Усі світильники встановлено на висоті понад 2,5 м. Для зменшення тіней використовується додаткове локальне освітлення біля панелі керування.

6.2.4 Виробничий шум

Основними джерелами шуму є насос, вентилятор та компресор. Рівень звуку в зоні розміщення оператора не перевищує **65 дБА**, що відповідає граничнодопустимим нормам згідно ДСН 3.3.6.037-99.

6.2.5 Виробничі вібрації

Джерелами вібрацій можуть бути:

- насос;
- вентилятор витяжки;
- компресор.

Всі ці механізми встановлено на антивібраційних опорах або подушках. Корпуси з'єднані з фундаментом через демпфуючі прокладки. Вібраційний вплив не передається на конструктивні елементи приміщення чи обладнання. Періодичні вимірювання рівня вібрацій здійснюються відповідно до ДСТУ EN ISO 5349-1:2014. Результати не перевищують допустимих значень.

6.2.6 Виробничі випромінювання

Електромагнітні випромінювання від блоку ПЛК та інших електронних модулів не перевищують ГДР за рахунок їх екранування металевими корпусами відповідно до ДСНіП №476.

В наявності лише інфрачервоне (теплове) випромінювання від нагрітих частин корпусу автоклаву, його рівень не перевищує ГДР за рахунок застосування термоізоляції.

Іонізуючі та ультрафіолетове випромінювання відсутні.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.3 Пожежна безпека та профілактика

6.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Автоматизована система керування автоклавом спроектована з урахуванням пожежонебезпечних чинників, пов'язаних із високими температурами, електричними навантаженнями та вологим середовищем. З метою запобігання загорянням і зменшення ймовірності виникнення пожежі в приміщенні реалізовано низку технічних заходів.

Уся силова та сигнальна електропроводка виконана кабелем у вогнестійкому виконанні, який не підтримує горіння та виділяє мінімальну кількість диму й токсичних речовин у разі загоряння. Електротехнічне обладнання встановлено у вологозахисених металевих шафах зі ступенем захисту не менше IP65, що запобігає потраплянню пари, пилу та вологи всередину корпусів.

Нагрівальні елементи автоклава оснащені термостатами і датчиками температури, які забезпечують автоматичне відключення живлення у разі перевищення встановлених граничних значень температури. Робота ТЕНів жорстко контролюється як через програму ПЛК, так і через апаратні захисти (теплові реле та роз'єднувачі). У разі втрати зв'язку з контролером або виходу параметрів за допустимі межі живлення ТЕНів блокується.

Додатково у вентиляційній системі встановлено зворотні клапани для запобігання поширенню диму або продуктів горіння через повітропроводи у разі виникнення пожежі. Загальна пожежна навантага в приміщенні мінімізована — не використовується легкозаймистих матеріалів, відсутні пластикові поверхні в зоні обладнання.

6.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Крім систем запобігання пожежам, у проєкті передбачено заходи активного пожежного захисту. Усі технічні рішення відповідають вимогам національних стандартів і нормативних документів, зокрема НАПБ А.01.001-2004, НАПБ Б.01.008-2018, ДСТУ ISO 7010:2020 та інших чинних регламентів.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У приміщенні згідно вимог ДБН В.2.5-56-2014 встановлено автоматичну пожежну сигналізацію, до складу якої входять теплові і димові датчики. Вона підключена до автономного джерела живлення і виконує безперервний моніторинг температури та наявності продуктів горіння у повітрі. У разі виявлення пожежонебезпечної ситуації подається світлова та звукова тривога, а також виводиться повідомлення на екран SCADA-системи.

Для гасіння пожежі у приміщенні операторської встановлено порошковий вогнегасник типу ВП-5 із мінімальним вмістом 5 кг вогнегасної речовини. Він розміщений біля входу до приміщення, закріплений на стіні на висоті 1,3 м і позначений відповідним піктограмним знаком. Також передбачено аварійну кнопку для знеструмлення всього обладнання в екстрених ситуаціях, яка розташована поруч із виходом [5].

План евакуації виконано у графічному вигляді з вказанням місць розташування засобів пожежогасіння, основного і запасного виходів, маршрутів евакуації, електрощита та аварійної кнопки. Усі евакуаційні виходи позначені фотолюмінесцентними покажчиками згідно з вимогами ДСТУ ISO 7010:2020, які світяться навіть у разі знеструмлення приміщення.

Весь обслуговуючий персонал проходить первинний інструктаж з пожежної безпеки, результати якого фіксуються в журналі. Один раз на рік проводяться протипожежні тренування з відпрацюванням евакуації, використанням вогнегасника та локалізацією умовної пожежі. Заходи, що реалізовані в межах цього проєкту, забезпечують високий рівень пожежного захисту та відповідають сучасним вимогам безпеки [5].

Висновки до розділу

Під час розроблення автоматизованої системи керування автоклавом були враховані чинні нормативні вимоги щодо охорони праці, безпеки працівників, пожежної профілактики та гігієнічних умов праці.

Запропоновані технічні рішення (застосування SCADA, аварійних зупинок, заземлення, блокувань і індикації) та організаційні заходи (інструктажі,

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контроль, обмеження доступу, ЗІЗ) забезпечують необхідний рівень безпеки при експлуатації обладнання. Санітарні параметри робочого середовища (освітленість, температура, шум, вологість) відповідають встановленим нормам, що сприяє збереженню здоров'я і підвищенню ефективності роботи персоналу.

Загалом, спроектована система дозволяє забезпечити надійну, безпечну та ефективну роботу автоклава, мінімізуючи професійні ризики та аварійні ситуації.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

У даному розділі виконується техніко-економічний розрахунок доцільності впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом автоклава (АСУТП). Метою розрахунку є визначення економічної ефективності автоматизації з урахуванням капітальних витрат, щорічної економії, витрат на експлуатацію та терміну окупності.

7.1 Джерела техніко-економічної ефективності

Економічна ефективність автоматизації досягається за рахунок:

- зниження собівартості продукції за рахунок зменшення витрат енергоносіїв, води та сировини;
- скорочення втрат продукції через зменшення браку;
- зменшення простоїв обладнання;
- зниження витрат на заробітну плату персоналу;
- зменшення витрат на технічне обслуговування за рахунок продовження строків міжремонтної експлуатації;
- підвищення якості та конкурентоспроможності продукції.
-

7.2 Капітальні витрати на впровадження АСУТП

До складу капіталовкладень входять витрати на:

- розробку проєктної документації — 40 000 грн;
- закупівлю обладнання (ПЛК, датчики, виконавчі механізми) — 180 000 грн;
- монтаж та налаштування системи — 60 000 грн;
- навчання персоналу — 20 000 грн.

Загальні капіталовкладення (К): $K = 40\,000 + 180\,000 + 60\,000 + 20\,000 = 300\,000$ грн.

7.3 Річна економія від автоматизації

Економія досягається за рахунок:

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- зменшення споживання електроенергії — 40 000 грн/рік;
- зменшення втрат продукції (брак) — 50 000 грн/рік;
- зменшення витрат на обслуговування — 30 000 грн/рік;
- економія заробітної плати (зменшення чисельності персоналу) — 60 000 грн/рік.

Сумарна річна економія (Е): $E = 40\,000 + 50\,000 + 30\,000 + 60\,000 = 180\,000$ грн/рік.

7.4 Додаткові витрати на експлуатацію АСУТП

До річних експлуатаційних витрат належать:

- профілактичне обслуговування обладнання — 15 000 грн/рік;
- оновлення ПЗ та підтримка — 10 000 грн/рік;
- амортизаційні відрахування — 5 000 грн/рік.

Загальні річні витрати на експлуатацію (В): $V = 15\,000 + 10\,000 + 5\,000 = 30\,000$ грн/рік.

7.5 Річна економічна ефективність

Річна економічна ефективність (РЕ): $PE = E - V = 180\,000 - 30\,000 = 150\,000$ грн/рік.

7.6 Строк окупності капіталовкладень

Строк окупності (Т): $T = K / PE = 300\,000 / 150\,000 = 2$ роки.

7.7 Економічний ефект від автоматизації

Нормативний коефіцієнт ефективності нової техніки — 0,15 (1/рік).
Економічний ефект (ЕЕ): $EE = PE - (K \times 0,15) = 150\,000 - (300\,000 \times 0,15) = 150\,000 - 45\,000 = 105\,000$ грн/рік.

Висновки до розділу

Отримані показники техніко-економічної ефективності впровадження АСУТП:

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Річна економічна ефективність — 150 000 грн/рік;
- Строк окупності — 2 роки;
- Економічний ефект — 105 000 грн/рік.

Автоматизація процесу стерилізації в автоклаві є доцільною як з технічної, так і з економічної точки зору. Впровадження АСУТП забезпечує швидку окупність капіталовкладень, щорічний додатковий прибуток та підвищення загальної ефективності виробництва. Таким чином, автоматизація є економічно вигіднішою альтернативою модернізації технологічного обладнання без автоматизації.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Розроблено техно-робочий проєкт автоматизованої системи управління технологічними процесами стерилізації в автоклаві. Проєкт реалізовано з використанням сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій, а саме:

- програмованого логічного контролера (PLC) Phoenix Contact;
- SCADA-системи WebStudio для супервізорного керування та моніторингу;
- інженерного моделювання в середовищі MatLab/Simulink;
- проєктування у CAD-системах;
- реалізації HMI-інтерфейсів для локального керування;
- цифрових протоколів обміну (4–20 мА, Modbus).

У результаті проєктування реалізовано чотири незалежні САР: регулювання температури, тиску, рівня води та витрати охолодження. Усі системи пройшли інженерний аналіз, імітаційне моделювання та функціональне тестування, що підтвердило їх роботоздатність і відповідність вимогам до якості перехідного процесу. Системи демонструють стійку поведінку, відсутність перерегулювання та високий рівень точності.

Впровадження АСУТП забезпечує технічний ефект у вигляді зниження питомих витрат електроенергії та зменшення браку продукції. Проєктні капіталовкладення в АСУТП становлять 300 тис. грн, а річна економічна ефективність — 150 тис. грн/рік. Розрахунковий строк окупності — 2 роки. Додатковий економічний ефект порівняно з традиційною модернізацією ТОУ становить 105 тис. грн/рік.

Проєкт може бути тиражований для аналогічних автоклавних установок у харчовій, фармацевтичній та хімічній промисловості. Завдяки використанню модульної структури ПЛК та SCADA, проєкт може бути легко адаптований і масштабований відповідно до вимог конкретного об'єкта.

Використання сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій дає змогу ефективно модернізувати проєкт для розширення функціоналу: впровадження ІоТ, цифрових двійників або інтеграції з ERP-системами підприємства. Це

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відкриває перспективи для подальшої цифровізації виробництва та зростання його економічної ефективності.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила виконання дипломного проєкту бакалавра. [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для здобувачів ВО рівня «бакалавр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем» / Т.Г. Баган, С.Г. Батюк, П.В. Гікало, С.В. Любицький, О.В. Некрашевич; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,6 МБайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 62 с.
2. Автоматизація вертикальних автоклавів - Харчова промисловість - Галузеві рішення - Рішення - СВ АЛЬТЕРА. СВ АЛЬТЕРА. URL: http://svaltera.ua/solutions/typical/food_industry/7363.php (дата звернення: 02.05.2025).
3. Савченко М. Ю., Радчук О. В. Автоматизація технологічного процесу стерилізації консервів. Scientific bulletin of the tavia state agrotechnological university. 2024. Т. 14, № 1. URL: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-11> (дата звернення: 07.05.2025).
4. Проєктування систем автоматизації (курсний проєкт) [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. Т. Г. Баган, В. П. Бунь, О. В. Некрашевич ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,69 МБайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 34 с. (дата звернення: 06.05.2025).
5. Закон України «Про охорону праці» – встановлює загальні правові норми з охорони праці, обов'язки роботодавця та працівника щодо безпечних умов праці.
6. НПАОП 0.00-4.12-05 – Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці.

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. **НПАОП 0.00-1.28-10** – Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин.
8. **НПАОП 40.1-1.32-01** – Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.
9. **ДСТУ EN ISO 13850:2018** – Безпечність машин. Аварійне зупинення. Принципи проєктування (EN ISO 13850:2015, IDT).
10. **ДБН В.2.2-9-2009** – Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення.
11. **ДБН В.2.5–67:2013** – Опалення, вентиляція та кондиціонування.
12. **ДБН В.2.5-28-2018** – Природне і штучне освітлення.
13. **ДСН 3.3.6.042-99** – Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
14. **ДСН 3.3.6.037-99** – Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
15. **НАПБ Б.01.008-2018** – Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників.
16. **ДСТУ EN 482:2022** – Повітря робочої зони. Загальні вимоги до характеристик методик вимірювання вмісту хімічних речовин (EN 482:2021, IDT).

					ТА-11388.013.001.АТХ.П	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		