

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

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 **Наталія СТЕЛЬМАХ**
«12» 06 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

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

**на тему: «Автоматизована система керування лабораторним стендом
високого гідростатичного тиску»**

Виконав:

**студент IV курсу, групи ПБ-321
Кривіч Богдан Петрович**



Керівник:

**к.т.н. старший викладач
Велигоцький Дмитро Володимирович**



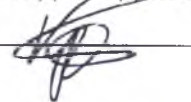
Рецензент:

**старший викладач
Кравченко І.В.**



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

Студент



Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	3	
2	A4	ДП.ПБ-з21.10.1720.ПЗ	Пояснювальна записка	123	
3	A1	ДП.ПБ-з21.10.1720.01.000.СБ	Насос гідравлічний регульований	1	
4	A4	ДП.ПБ-з21.10.1720.02.000	Автономна клапанна камера. Специфікація	1	
5	A3	ДП.ПБ-з21.10.1720.02.000.СБ	Автономна клапанна камера	1	
6	A4	ДП.ПБ-з21.10.1720.03.000	Електровід в камеру високого тиску. Специфікація	1	
7	A3	ДП.ПБ-з21.10.1720.03.000.СБ	Електровід в камеру високого тиску	1	
8	A4	ДП.ПБ-з21.10.1720.04.000	Комірка високотемпературна. Специфікація	1	
9	A3	ДП.ПБ-з21.10.1720.04.000.СБ	Комірка високотемпературна	1	
10	A1	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.000.СБ	Вентиль високого тиску	1	
11	A4	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.007	Втулка	1	
12	A3	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.009	Обойма	1	
13	A4	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.004	Поршень	1	
14	A4	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.005	Поршень	1	
15	A4	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.006	Стержень	1	
16	A1	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.001	Циліндр	1	
17	A3	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.002	Циліндр	1	
18	A3	ДП.ПБ-з21.10.1720.05.003	Циліндр	1	
19	A3	ДП.ПБ-з21.10.1720.06.001 СхА	Функціональна схема автоматизації	1	

				ДП.ПБ-з21.10.1720 ПЗ		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розроб.	Кривіч Б.П.				1	1
Керівн.	Велигоцький Д.В.					
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП гр. ПБ-з21	
Н/контр.						
Зав. каф.	Стельмах Н.В.					

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

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 **Наталія СТЕЛЬМАХ**
«12» 06 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Кривічу Богдану Петровичу

1. Тема проєкту «Автоматизована система керування лабораторним стендом високого гідростатичного тиску», керівник проєкту Велигоцький Дмитро Володимирович, к.т.н. старший викладач, затверджені наказом по університету від «25» травня 2026 р. № 1888-с
2. Термін подання студентом проєкту «07» червня 2026 року.
3. Вихідні дані до проєкту: плата з мікроконтролером Arduino UNO: робоча напруга (5 В), напруга живлення (рекомендована від 7 до 12 В, гранична від 6 до 20 В), максимальний струм через I/O вивід (40 мА), максимальний струм для виводу 3.3V (50 мА), частота мікроконтролера (16 МГц), об'єм ОЗУ (SRAM) (2 КБ), об'єм ПЗУ (EEPROM) (1 КБ), об'єм флеш пам'яті (32 КБ, з яких 0.5 КБ використовується завантажувачем), кількість цифрових входів/виходів (14, з яких 6 можуть працювати у режимі ШІМ), кількість аналогових входів (6), діапазон робочих температур (від -40 до +85 °С); Геометричний датчик тиску (повітря та рідини) MS5803-14BA: робоча напруга (від 1.8 до 3.6 В), діапазон вимірювання абсолютного тиску (від 0 до 14 бар), роздільна здатність (до 0.012 мбар), інтерфейси передачі даних (I2C та SPI), споживання струму (0.6 мкА у режимі очікування, до 12.5 мкА при піковому перетворенні), інтегрований АЦП (24 біти), діапазон робочих температур (від -40 до +85 °С), точність вимірювання температури (± 0.8 °С), тип корпусу (керамічний з металевою кришкою та захисним гелем для роботи в рідинах та агресивних середовищах); модуль датчика Холла SS49E: робоча напруга (від 3.0 до 6.5 В), споживання струму (до 10 мА), типи вихідного сигналу (аналоговий (АО) та цифровий (DO)), чутливість (1.4 мВ/Гс), вихідна напруга у стані спокою (при 5 В живлення) (~2.5 В), інтегрований подвійний компаратор (на чіпі LM393), можливість регулювання порогу спрацьовування цифрового

виходу (за допомогою підлаштовного резистора на платі), світлова індикація (світлодіод живлення та світлодіод стану цифрового виходу), діапазон робочих температур (від -40 до +85 °C); модуль датчика температури та вологості SHT20: робоча напруга (від 3.3 до 5 В), інтерфейс підключення (I2C), діапазон вимірювання вологості (від 0 до 100%), точність вимірювання вологості ($\pm 3\%$), діапазон вимірювання температури (від -40 до +125 °C), точність вимірювання температури (± 0.3 °C), енергоспоживання (0.15 мкА у режимі сну, до 300 мкА при вимірюванні), час відгуку (8 с), роздільна здатність (12 біт для вологості, 14 біт для температури), тип сенсора (цифровий, з повною взаємозамінністю без додаткового калібрування).

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Огляд і аналіз систем автоматизації для лабораторного стенду високого гідростатичного тиску. Розділ 2. Розроблення алгоритму функціонування та проєктування конструкції автоматизованої системи керування лабораторним стендом. Розділ 3. Експериментальне дослідження особливостей розробленої автоматизованої системи.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): функціональна схема автоматизованої системи керування лабораторним стендом високого гідростатичного тиску; блок-схеми алгоритмів; принципова електрична схема системи; кресленики складових лабораторного стенду: гідравлічний регульований насос (A1), автономна клапанна камера (A3), електроввід до камери високого тиску (A3), комірка високотемпературна (A3), вентиль високого тиску (A1), деталювання.

6. Дата видачі завдання «06» квітня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Літературний огляд та аналіз методів створення високого гідростатичного тиску	07.04.2026	
2	Розробка функціональної схеми автоматизованої системи керування лабораторним стендом	15.04.2026	
3	Розробка алгоритмів роботи системи	24.04.2026	
4	Розробка принципової електричної схеми системи, вибір та обґрунтування схемотехнічних компонентів	05.05.2026	
5	Розробка програмного забезпечення	18.05.2026	
6	Оформлення пояснювальної записки та креслень	28.05.2026	
7	Подання дипломного проєкту до захисту	05.06.2026	

Студент

Богдан КРІВІЧ

Керівник

Дмитро ВЕЛИГОЦЬКИЙ

**Пояснювальна записка до дипломного проєкту на
тему: «Автоматизована система керування
лабораторним стендом високого гідростатичного
тиску»**

АНОТАЦІЯ

У дипломному проєкті було розглянуто технологію обробки надвисоким гідростатичним тиском як дуже важливу складову сучасних дослідницьких та виробничих процесів, зокрема у матеріалознавстві, фізиці твердого тіла та харчовій промисловості. Огляд джерел у цій роботі сфокусований на тому, як саме екстремальний тиск впливає на фізико-хімічні, термодинамічні та реологічні властивості робочого середовища, включаючи явища адіабатичного нагрівання та зміну фазових станів води. Окрім біофізичних механізмів паскалізації та застосування екологічних пакувальних матеріалів, було досліджено фазову стабільність і структуроутворення перспективних сплавів, а також особливості магнітних перетворень речовини за екстремальних температур і тисків. Також було детально оглянуто існуючий лабораторний стенд, автономні клапанні камери високого тиску з розробленими високотемпературними комірками і багатоканальними електровводами, проаналізовано небезпеку ручного керування та фактори, що можуть призвести до гідроударів. Саме на основі цих проаналізованих даних була розроблена комп'ютерно-інтегрована система автоматизації стабілізації тиску на базі Arduino Uno та Zelio Logic. Вона усуває критичні ризики користувацького керування установкою завдяки впровадженню прецизійного ПД-регулювання з використанням високоточних цифрових датчиків, надійних протиаварійних блокувань та передової архітектури, ефективність якої підтверджено віртуальним моделюванням у середовищі Tinkercad.

Робота містить 124 сторінок, включає 37 рисунків та 26 літературних джерел.

Ключові слова: високий гідростатичний тиск, автоматизація, автономна клапанна камера, стабілізація тиску, ПД-регулятор, мікроконтролер Arduino, система керування, протиаварійний захист, віртуальне моделювання.

ANNOTATION

In the diploma project, ultra-high hydrostatic pressure processing technology was considered as a highly important component of modern research and manufacturing processes, particularly in materials science, solid-state physics, and the food industry. The literature review in this work is focused on exactly how extreme pressure affects the physicochemical, thermodynamic, and rheological properties of the working medium, including the phenomena of adiabatic heating and changes in the phase states of water. In addition to the biophysical mechanisms of pascalization and the use of eco-friendly packaging materials, the phase stability and structure formation of advanced alloys were investigated, along with the specifics of magnetic transformations of matter under extreme temperatures and pressures. The existing laboratory test bench was also reviewed in detail, including autonomous high-pressure valve chambers with developed high-temperature cells and multichannel electrical feedthroughs, and the hazards of manual control and factors that can lead to hydraulic shocks were analyzed. Based specifically on the analyzed data, a computer-integrated automation system for pressure stabilization was developed based on Arduino Uno and Zelio Logic. It eliminates the critical risks of user-controlled operation through the implementation of precision PID control using high-accuracy digital sensors, reliable emergency interlocks, and an advanced architecture, the efficiency of which was confirmed by virtual modeling in the Tinkercad environment.

The work consists of 124 pages, includes 37 figures and 26 references.

Keywords: high hydrostatic pressure, automation, autonomous valve chamber, pressure stabilization, PID controller, Arduino microcontroller, control system, emergency protection, virtual modeling.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ВИСОКОГО ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ	14
1.1. Основа технології високого гідростатичного тиску та застосування....	14
1.1.1. Термодинамічні та реологічні властивості робочих середовищ при надвисоких тисках	15
1.1.2. Фізико-хімічні основи процесу та аналіз фазовії діаграми стану води 16	
1.1.3. Конструктивні особливості та принцип роботи камер ізостатичного стиснення 19	
1.1.4. Перспективні напрямки застосування технології високого тиску в суміжних галузях.....	20
1.1.5. Інженерно-технічні виклики реалізації процесів надвисокого тиску та обґрунтування необхідності автоматизації	21
1.1.6. Дослідження фазової стабільності та структуроутворення перспективних сплавів в умовах надвисокого тиску	24
1.2. Аналіз сучасних підходів та архітектур побудови систем автоматизації високотискового обладнання	28
Висновок до першого розділу.....	33
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛАБОРАТОРНИМ СТЕНДОМ	35
2.1. Загальна архітектура лабораторного стенду як об'єкта автоматизації	35
2.2. Насос гідравлічний регульований	36
2.2.1. Конструкція та принцип дії насоса	38
2.2.2. Гідродинаміка робочого циклу	39
2.2.3. Схема електрична принципова та система безпеки	40
2.3. Апаратура високого тиску	41
2.3.1. Автономні камери високого тиску	41
2.3.2. Пристрої створення високого гідростатичного тиску.....	51
2.4. Вимірювання тиску	56
2.5. Комутаційно-вимірювальний вузол системи нагнітання	57
2.6. Конструкція та принцип дії вентилі високого тиску	58

2.7. Теоретичні відомості розробки.....	60
2.8. Розробка функціональної схеми автоматизації	68
2.9. Опис алгоритму функціонування автоматизованої системи.....	72
2.10. Віртуальне моделювання та верифікація інформаційно-керуючого контуру в середовищі Tinkercad.....	75
Висновок до другого розділу	81
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗРОБЛЕНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	83
3.1. Мета, умови та методика проведення віртуального експерименту	83
3.2. Експериментальне дослідження контуру автоматичної стабілізації тиску	84
3.3. Експериментальне дослідження підсистеми протиаварійного захисту та блокувань.....	89
Висновок до третього розділу.....	92
ВИСНОВКИ	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96
Додаток А.....	100
Додаток Б	117
Додаток В.....	120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВГТ — високий гідростатичний тиск.

АЦП — аналого-цифровий перетворювач.

ШІМ — широтно-імпульсна модуляція.

САК — система автоматичного керування.

ПЛК — програмований логічний контролер.

ПІД-регулятор — пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

ОЗУ (SRAM) — оперативний запам'ятовуючий пристрій (статична оперативна пам'ять).

ПЗУ (EEPROM) — постійний запам'ятовуючий пристрій (електрично перепрограмована пам'ять).

HPP — High Pressure Processing (міжнародна назва технології ВГТ).

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

IPC — промисловий комп'ютер (Industrial PC).

RTOS / FreeRTOS — операційна система реального часу.

MCU — мікроконтролер (Microcontroller Unit).

I2C / SPI — протоколи та інтерфейси цифрової передачі даних.

АО / DO — аналоговий (Analog Output) та цифровий (Digital Output) виходи датчиків.

УВД — установка високого тиску.

НЕА — високоентропійні сплави.

ГЦК / ОЦК — гранецентрована та об'ємноцентрована кубічні ґратки матеріалів

P — гідростатичний тиск.

T — температура.

V — молярний (або поточний) об'єм системи чи кристалічної комірки.

G — вільна енергія Гіббса.

E — модуль Юнга (пружності).

ВСТУП

Сучасні технології впливу на матеріали та середовища мають безліч унікальних застосувань і постійно вдосконалюються завдяки впровадженню новітніх комп'ютерно-інтегрованих систем. У різних наукових дослідженнях та галузях промисловості певні технології виявляються більш ефективними, тому перш за все головна мета інженерів з автоматизації — визначити та оптимізувати найбільш безпечний, точний і вигідний метод керування процесами обробки.

Обробка надвисоким гідростатичним тиском (ВГТ) — це один із тих передових методів, потенціал якого сьогодні розкривається з новою силою завдяки розвитку засобів контролю. Використання екстремальних тисків, що сягають сотень мегапаскалів, неминуче створює низку серйозних технічних викликів, які можуть передувати вдалому його впровадженню, особливо щодо безпеки персоналу та обладнання. Проте сучасні засоби мікропроцесорної автоматизації дозволяють нівелювати ці ризики, відкриваючи все ширші горизонти для лабораторного та комерційного застосування саме цього методу.

Хоча в основі технології лежить доволі зрозумілий фізичний принцип ізостатичного стиснення, її надійність та універсальність здатні відкрити багато нових експериментальних напрямків. Існуючі базові установки часто мають ручне або напівавтоматичне керування і нечасто включають комплексні підходи до безпеки, але впровадження прецизійних алгоритмів регулювання кардинально змінює ситуацію. Не дуже багато видів обробки можуть дати стабільний і якісний результат у подібних екстремальних режимах без ризику гідродинамічних ударів чи руйнування камери.

Галузі, в яких застосовується вплив високого гідростатичного тиску, є надзвичайно різноманітними. Насамперед ця технологія є невід'ємною складовою сучасного матеріалознавства та фізики твердого тіла, де вона використовується для глибокого дослідження фазових переходів речовин та

магнітних перетворень за екстремальних умов. Крім того, вплив високого тиску відкриває нові можливості у порошковій металургії для ізостатичного пресування деталей , а також дозволяє ефективно керувати процесами структуроутворення перспективних багатокомпонентних сплавів, забезпечуючи створення інноваційних матеріалів з унікальними експлуатаційними характеристиками.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ВИСОКОГО ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ

1.1. Основа технології високого гідростатичного тиску та застосування

Сучасний розвиток промислових технологій вимагає впровадження принципово нових, енергоефективних та екологічно безпечних методів обробки матеріалів і речовин. Серед таких напрямків особливе місце посідає технологія високого гідростатичного тиску, яка в міжнародній інженерній практиці відома як High Pressure Processing. Цей метод базується на генерації та прикладанні до об'єктів надвисокого механічного напруження в діапазоні від 100 до 1000 МПа і більше в ізольованому рідинному середовищі. На відміну від одновісного або пресового стиснення, де виникають значні зсувні деформації та руйнування макроструктури, гідростатичний тиск діє всенаправлено і рівномірно. Актуальність автоматизації таких установок обумовлена екстремальними умовами їх експлуатації та необхідністю забезпечення абсолютної вибухобезпеки та прецизійного керування параметрами в реальному часі.

В основі технології високого гідростатичного тиску лежать фундаментальні закони класичної гідромеханіки та термодинаміки, зокрема закон Паскаля та принцип Ле Шательє-Брауна. Згідно із законом Паскаля, зовнішній тиск, прикладений до рідини в замкненому об'ємі, передається у кожному точку середовища рівномірно і всенаправлено, незалежно від геометрії робочої камери. Це забезпечує абсолютну однорідність обробки продукту чи матеріалу по всьому його об'єму, виключаючи появу небезпечних градієнтів механічних напружень. Принцип Ле Шательє визначає динаміку термодинамічної рівноваги системи під дією екстремальних навантажень, згідно з яким підвищення тиску зміщує рівновагу в бік процесів, що супроводжуються зменшенням сумарного об'єму речовини. Це зумовлює

значне зближення атомів та молекул, викликаючи зміну кристалічної структури, фазові переходи, прискорення реакцій полімеризації та конденсацію молекулярних систем.

1.1.1. Термодинамічні та реологічні властивості робочих середовищ при надвисоких тисках

Важливим додатковим аспектом термодинаміки цього процесу є те, що у звичайній інженерній гідравліці робочі рідини вважаються абсолютно нестисливими, проте в умовах надвисоких гідростатичних тисків їхня фізична поведінка докорінно змінюється. При досягненні тисків у сотні мегапаскалей реальний об'єм води або гідравлічної оливи помітно зменшується через подолання міжмолекулярних зазорів. Таке інтенсивне стиснення замкненого об'єму неминуче супроводжується явищем адіабатичного нагрівання середовища за рахунок внутрішнього тертя молекул, що викликає підвищення температури робочого тіла приблизно на 2–3 °C на кожні 100 МПа підйому тиску. Цей термодинамічний ефект є строго зворотним, тому в момент декомпресії рідина миттєво охолоджується до свого вихідного стану, що необхідно враховувати при розрахунку теплового балансу та захисту полімерних манжет ущільнювальних пристроїв від локального перегріву.

Окрім температурних коливань, мікроструктурне ущільнення речовини під дією високого гідростатичного тиску призводить до різкого експоненційного зростання динамічної в'язкості рідини. За умов екстремального стиснення гідравлічні мастила можуть частково втрачати свою текучість і переходити у квазітверду фазу, що докорінно змінює характер гідродинамічних процесів у системі. Це явище суттєво підвищує коефіцієнт внутрішнього опору та сили тертя в контактних зонах рухомого штока й голчастого затвора, створюючи додаткові механічні перешкоди під час відсікання потоку. Отже, урахування змін реологічних параметрів середовища є критично важливим етапом при проєктуванні систем автоматичного керування, оскільки автоматика повинна динамічно адаптувати зусилля

привода для подолання змінного опору та запобігання заклинюванню регулювальних органів.

1.1.2. Фізико-хімічні основи процесу та аналіз фазової діаграми стану води

На мікроструктурному рівні високий гідростатичний тиск діє вибірково, руйнуючи слабкі нековалентні взаємодії, такі як водневі зв'язки, іонні зв'язки та гідрофобні взаємодії, при цьому залишаючи повністю неушкодженими міцні ковалентні зв'язки. Цей феномен є ключовим для багатьох біотехнологічних процесів, оскільки дозволяє денатурувати високомолекулярні білки та інактивувати ферменти, не змінюючи структуру низькомолекулярних сполук, таких як вітаміни чи ароматичні молекули. Окрему увагу в термодинаміці високотискових процесів приділяють реальній стисливості рідин, адже при тисках близько 600 МПа об'єм води або гідравлічної оливи зменшується майже на п'ятнадцять відсотків. Таке стиснення супроводжується явищем адіабатичного нагрівання середовища за рахунок внутрішнього міжмолекулярного тертя, проте цей ефект є строго зворотним, і при декомпресії система миттєво охолоджується до вихідного температурного стану.

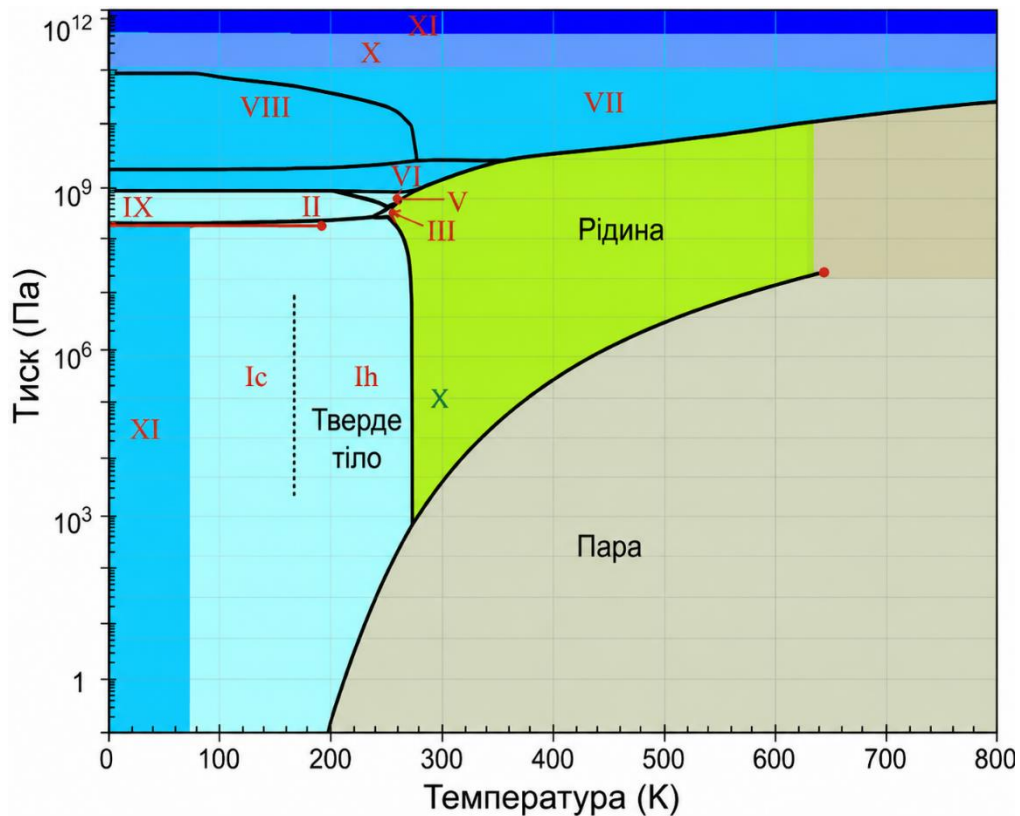


Рисунок 1.1. Фазова діаграма стану води у широкому діапазоні тисків та температур із позначенням поліморфних модифікацій льоду [3]

Для детального аналізу меж стійкості рідкої фази робочого середовища та визначення зон безпечної експлуатації установки у дипломному проєкті використовується геометричний аналіз фазової P-T діаграми стану води у комбінації з експериментальними даними таблиць її потрібних точок. Представлена діаграма наочно ілюструє існування кількох кристалічних модифікацій льоду, що виникають за умов надвисокого гідростатичного тиску, кожна з яких має унікальну просторову архітектуру молекулярної ґратки та власні термодинамічні характеристики. Особливу інженерну цінність для побудови алгоритмів керування мають точні координати фазових рівноваг, зафіксовані у термодинамічних таблицях потрібних точок, оскільки вони визначають аналітичні вузли, де межують зони стабільності різних поліморфних модифікацій.

Представлена фазова діаграма відображає стабільні фізичні стани речовини за різних значень температури та тиску. За типових кімнатних умов

(позначених точкою «х» у зони Liquid) вода перебуває в рідкій фазі, проте зазнає стрибкоподібного переходу у твердий стан (лід Ih) при зниженні температури або в газоподібний (Vapor) при її підвищенні. Лінії на діаграмі фіксують термодинамічні умови співіснування двох фаз, тоді як у вузлах сполучення трьох ліній формуються потрібні точки, де в рівновазі перебувають одночасно три фази. Критичні точки, позначені на схемі червоними колами, визначають параметри, за яких фізичні властивості суміжних фаз стають нерозрізними. [3]

Усі стабільні тверді фази високого тиску характеризуються наявністю водневих зв'язків, де кожен молекулярний вузол зв'язаний із чотирма сусідніми молекулами води, утворюючи кут між зв'язками Н-О-Н близько 107° . Зі зростанням компресійного навантаження відбувається ущільнення кристалічної структури льоду шляхом деформації зв'язків та формування взаємопроникних молекулярних мереж. Важливою інженерною особливістю системи є те, що в безпосередній рівновазі з рідкою водою (Liquid) можуть перебувати лише гексагональний лід першого типу (Ih), а також високотискові модифікації льоду третього (III), п'ятого (V), шостого (VI) та сьомого (VII) типів. Інші фази, включаючи лід другого (II), восьмого (VIII) та дев'ятого (IX) типів, є термодинамічно нестабільними в контакті з рідиною за будь-яких умов.

Особливу область діаграми займає надкритичний стан, розташований вище та праворуч від головної критичної точки в рідко-паровому просторі. У цій зоні вода існує у вигляді диспергованих кластерів із мінливими фізичними властивостями, які радикально відрізняються від параметрів середовища за амбієнтних умов. Через низьку діелектричну проникність надкритична вода стає поганим розчинником для електролітів, але набуває високої розчинності щодо неполярних молекул. У контексті автоматизації гідравлічних систем аналіз координат фазових ліній і потрібних точок для льоду типів VI та VII є критично важливим, оскільки ці дані визначають математичні межі, за якими

робоче тіло втрачає текучість, що вимагає превентивного захисту виконавчих органів запірної арматури від заклинювання.

1.1.3. Конструктивні особливості та принцип роботи камер ізостатичного стиснення

Одним із найбільш динамічних напрямків практичного застосування високого гідростатичного тиску є харчова промисловість, де ця технологія стала основою для створення продуктів із мінімальною хімічною обробкою. Обробка харчових продуктів у герметичній еластичній упаковці під тиском від 400 до 600 МПа забезпечує гарантовану інактивацію патогенних мікроорганізмів, бактерій, дріжджів та плісняви через руйнування їхніх клітинних мембран. Завдяки збереженню ковалентних зв'язків у продукті повністю залишаються незмінними термолабільні сполуки, первинний колір та смакові якості, що дозволяє суттєво збільшити термін зберігання без використання термічної деструкції.

Детальніший аналіз біофізичних процесів під час паскалізації показує, що деструкція мікрофлори досягається не лише механічним руйнуванням клітинних оболонок, а й глибоким порушенням внутрішньоклітинного метаболізму патогенів. Надвисокий гідростатичний тиск викликає конформаційні зміни та денатурацію транспортних і структурних протеїнів, що повністю блокує роботу іонних насосів клітинної мембрани і призводить до осмотичного шоку мікроорганізму. Крім того, під дією тиску відбувається дисоціація клітинних рибосом та інактивація ключових ферментів, відповідальних за реплікацію, при цьому сама первинна структура ДНК і РНК залишається стабільною завдяки високій міцності ковалентних зв'язків. Особливе інженерне значення має також здатність технології ВГТ пригнічувати активність ендогенних ферментів (зокрема, поліфенолоксидази та пероксидази), які у звичайних умовах викликають ферментативне потемніння, розшарування та псування рослинної сировини, що дозволяє

довгостроково стабілізувати якість соків та пюре без внесення хімічних стабілізаторів.

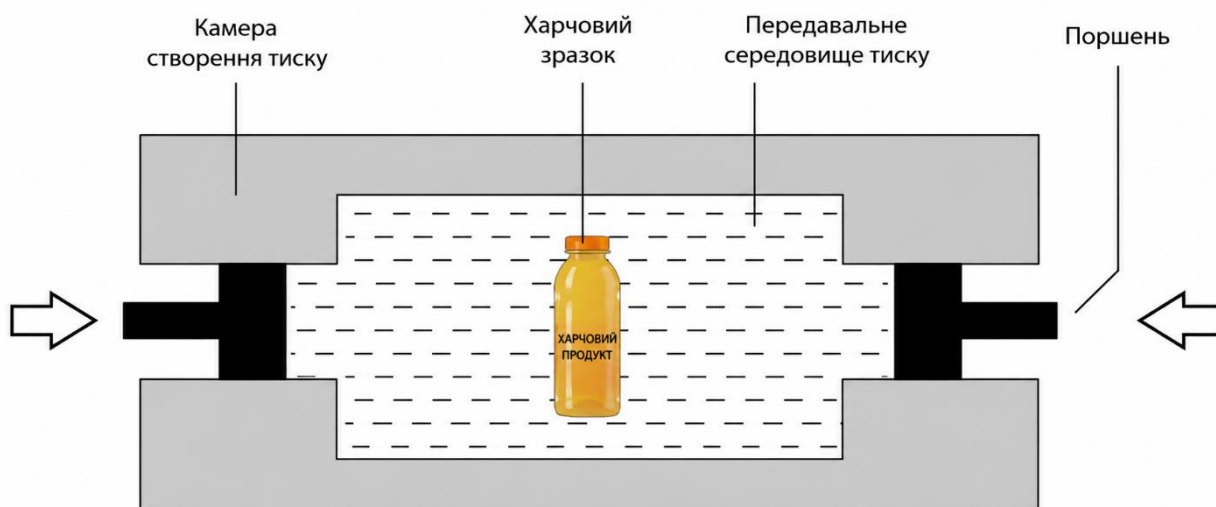


Рисунок 1.2. Принципова інженерна схема камери ізостатичного стиснення з двостороннім поршневим нагнітанням тиску [4]

Конструктивна схема робочого простору установки (див. рис. 1.2) базується на використанні товстостінного циліндра (Камера створення тиску), всередині якого розміщується зразок харчового продукту (Харчовий зразок) у гнучкій упаковці. Передача механічного зусилля здійснюється через рідке середовище (Передавальне середовище тиску), що стискається за допомогою зустрічного руху поршневої групи (Поршень). [4]

1.1.4. Перспективні напрямки застосування технології високого тиску в суміжних галузях

У сфері матеріалознавства та порошкової металургії технологія високого гідростатичного тиску реалізується у процесах гідроекструзії, а також гарячого та холодного ізостатичного пресування. Гідроекструзія дозволяє проводити пластичне деформування важкооброблюваних, крихких металів і сплавів шляхом їх продавлювання через матрицю під дією всебічного рідинного стиснення, що повністю нівелює появу мікротріщин і дефектів

кристалічної ґратки. Ізостатичне пресування використовується для спікання та ущільнення металевих або керамічних порошків, забезпечуючи отримання монолітних деталей складної геометричної форми з абсолютно однорідною структурою та нульовою пористістю, що є критично важливим для космічної та авіаційної галузей.

Фармацевтична індустрія та біомедицина використовують високий гідростатичний тиск для делікатної стерилізації складних білкових препаратів, сироваток крові та вакцин, що також є вкрай важливим етапом підготовки зразків для сучасних методів оптичної діагностики серцево-судинної системи, багатохвильової фотоплетизмографії [6, 7] та досліджень фотодисоціації оксигемоглобіну [5]. Традиційні методи термічної обробки руйнують структуру ліків, тоді як контрольований гідростатичний тиск знищує вірусні та бактеріальні агенти, зберігаючи терапевтичну цінність і структуру протеїнів. Крім того, у кріобіології технологія високого тиску відкриває нові можливості для консервації живих органів та тканин, оскільки екстремальне стиснення знижує температуру замерзання води, запобігаючи утворенню гострих кристалів льоду, які фізично руйнують клітинні оболонки.

1.1.5. Інженерно-технічні виклики реалізації процесів надвисокого тиску та обґрунтування необхідності автоматизації

Проектування, налагодження та експлуатація технічних систем для реалізації процесів високого гідростатичного тиску супроводжуються подоланням комплексу критичних інженерних викликів, які лежать на стику матеріалознавства, нелінійної гідродинаміки та теорії автоматичного керування. Робота обладнання в екстремальному діапазоні тисків (від 400 до 600 МПа і більше) висуває безпрецедентні вимоги до механічної міцності конструкційних елементів. Через виникнення колосальних розтягувальних тангенціальних напружень у стінках циліндрів, робочі камери та магістральні трубопроводи неможливо виготовити у вигляді простих монолітних елементів. Вони виконуються у вигляді складних багатошарових конструкцій

із попереднім натягом або піддаються процедурі автофретування (попереднього пластичного деформування внутрішніх шарів надвисоким тиском) для зміщення кривої еквівалентних напружень у безпечну зону. [8]



Рисунок 1.3. Структурна схема багатошарової гнучкої полімерної плівки із зазначенням функціональних добавок для модифікації її властивостей [8]

Головна аналітична складність з точки зору керування полягає у суттєвій нелінійності динамічних властивостей об'єкта регулювання. Як було зазначено в термодинамічному аналізі, за умов надвисокого тиску робочі рідини (вода або гідравлічні оливи) втрачають властивість умовної нестисливості: їхній реальний об'єм зменшується на 12–15 %, а динамічна в'язкість зростає за експоненційним законом. Це призводить до того, що гідравлічний контур змінює свої передаточні коефіцієнти безпосередньо в процесі нагнітання тиску. Одночасний прояв ефекту зворотного адіабатичного нагрівання спотворює температурний профіль у камері, змінюючи реологічні параметри середовища та створюючи додатковий опір руху виконавчих механізмів.

Особливо гостро проблема регулювання постає на етапах компресії та декомпресії. При підйомі тиску: класичні лінійні закони регулювання (наприклад, стандартні ПД-алгоритми з фіксованими коефіцієнтами) виявляються неефективними, оскільки об'єкт автоматизації змінює свої параметри в часі. Виникає ризик перерегулювання та аварійного стрибка тиску вище гранично допустимого значення P_{max} . При декомпресії (скиданні тиску): різке відкриття запірних органів викликає миттєвий перехід потенційної енергії стиснутої рідини в кінетичну енергію потоку, що супроводжується інтенсивною кавітацією, гідроударами та кавітаційним ерозійним руйнуванням сідел голчастих вентилів і руйнуванням еластичної упаковки зразків. Для запобігання цьому декомпресія повинна здійснюватися за строго розрахованою експоненціальною траєкторією.

Зазначені виклики роблять ручне або напіваавтоматичне керування лабораторним стендом повністю неможливим і технічно небезпечним. Будь-яка затримка реакції оператора або помилка при вимірюванні параметрів може призвести до вибухоподібної розгерметизації контуру з катастрофічними наслідками для персоналу та обладнання.

Таким чином, виникає жорстка інженерна потреба у розробленні та впровадженні високонадійної комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування (САК). Автоматизація технологічного комплексу покликана вирішити наступні завдання:

- Прецизійний моніторинг у реальному часі: безперервний збір даних із високоточних цифрових та аналогових сенсорів тиску, температури та положення виконавчих органів.
- Динамічна адаптація керуючого впливу: реалізація мікроконтролерних алгоритмів, що здатні гнучко змінювати швидкість нагнітання тиску (шляхом регулювання приводів насосів чи крокових двигунів вентилів) з урахуванням поточної стисливості та в'язкості середовища.

- Програмне формування профілю декомпресії: забезпечення керованого, покрокового скидання тиску для мінімізації кавітаційного зносу арматури.
- Багаторівневий протиаварійний захист (interlocks): миттєве апаратне та програмне реагування на вихід параметрів за безпечні межі, виявлення мікропротікань та автоматичне блокування системи при загрозі аварії.

1.1.6. Дослідження фазової стабільності та структуроутворення перспективних сплавів в умовах надвисокого тиску

Застосування екстремальних зовнішніх полів, зокрема надвисокого гідростатичного тиску (ВГТ), є одним із найбільш передових методів модифікації кристалічної структури та фундаментальних фізико-механічних властивостей твердих тіл. Останні світові дослідження у галузі передового матеріалознавства показують, що вплив високого тиску на перспективні металеві системи (такі як високоентропійні сплави, титанові та магнієві матриці) дозволяє досягати унікальних фазових станів, які є недосяжними за звичайних умов термічної чи термомеханічної обробки.

З термодинамічної точки зору, механізм впливу гідростатичного тиску на фазові рівноваги у багатокомпонентних металевих системах визначається зміною вільної енергії Гіббса (G). За умов постійної температури зміна енергії Гіббса як функція тиску описується відомим диференціальним співвідношенням:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = V, \quad (1.1)$$

де V — молярний об'єм системи. Для кінцевого діапазону тисків інтегральна форма зміни термодинамічного потенціалу при переході системи з початкового стану (при атмосферному тиску P_0) у стан надвисокого тиску (P) набуває вигляду:

$$\Delta G(P) = \Delta G_0 + \int_{P_0}^P \Delta V(P) dP, \quad (1.2)$$

де ΔG_0 — зміна вільної енергії за атмосферного тиску, а $\Delta V(P)$ — різниця молярних об'ємів вихідної та новоутвореної фаз як функція тиску. Оскільки зміна об'єму (ΔV) для процесів компресії переважно є від'ємною через зменшення міжатомних відстаней та ущільнення кристалічної ґратки, збільшення тиску термодинамічно стимулює формування більш щільно упакованих фаз. Проте для забезпечення надійності та довговічності елементів конструкцій обладнання надвисокого тиску критично важливим є дослідження пружних характеристик та механічної стабільності таких високощільних фазових модифікацій у робочому діапазоні температур. Поведінка механічних властивостей матеріалу під час подібних структурних перебудов наочно ілюструється температурною залежністю модуля Юнга (E) за умов мартенситного фазового перетворення (рис. 1.4).

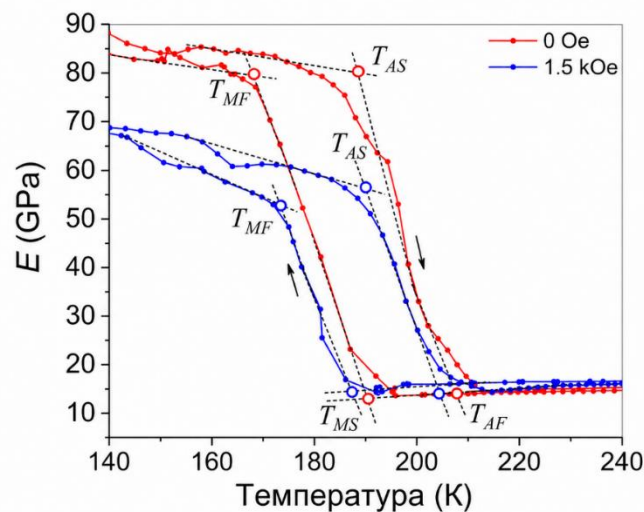


Рисунок 1.4. Залежність відносної ентальпії кристалічних модифікацій сплаву від величини зовнішнього гідростатичного тиску [9]

Як видно з графіка, матеріал демонструє чітко виражений структурний фазовий перехід мартенситного типу з характерною петлею гістерезису. Критичні точки на кривих відповідають температурам початку (T_{MS} , T_{AS}) та завершення (T_{MF} , T_{AF}) мартенситного й аустенітного перетворень відповідно. Накладання зовнішнього магнітного поля напруженістю 1,5 кЕ (синя крива) призводить до зміщення температурних інтервалів фазового переходу та

зниження абсолютних значень модуля пружності, що підтверджує наявність сильного магнітопружного зв'язку в структурі.

Для аналітичного опису стисливості та деформаційної поведінки кристалічної комірки перспективних сплавів у широкому діапазоні тисків застосовують феноменологічне ізотермічне рівняння стану Берча — Мурнагана (Birch–Murnaghan) третього порядку. Воно пов'язує діючий гідростатичний тиск P із відносним зменшенням об'єму кристалічної комірки:

$$P(V) = \frac{3B_0}{2} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{7}{3}} - \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{5}{3}} \right] \left\{ 1 + \frac{3}{4} (B'_0 - 4) \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right] \right\}, \quad (1.3)$$

де:

- V_0 — початковий об'єм кристалічної комірки за атмосферного тиску;
- V — поточний об'єм комірки під дією тиску P ;
- B_0 — ізотермічний об'ємний модуль пружності (модуль всебічного стиснення) при $P = 0$;
- B'_0 — перша похідна об'ємного модуля пружності за тиском.

Для кількісної оцінки впливу мікроструктурних трансформацій на макромеханічні властивості сплаву було проаналізовано залежність модуля Юнга (E) від об'ємної частки сприятливого варіанту мартенситної фази (α) за фіксованої температури $T = 172\text{ K}$ (рис. 1.5). Розрахункові криві, отримані для різних значень початкових параметрів структури (панель a для $\alpha_0 = \frac{1}{3}$ та панель b для $\alpha_0 = \frac{1}{2}$), демонструють монотонне нелінійне зниження модуля пружності в міру збільшення концентрації мартенситу. Штриховими лініями на графіках відображено експериментально зафіксовані рівні зміни модуля деформації за умов відсутності магнітного поля та в полі напруженістю $1,5\text{ кЕ}$, що дозволяє встановити чітку кореляцію між об'ємним вмістом нової фази і пружним відгуком матеріалу

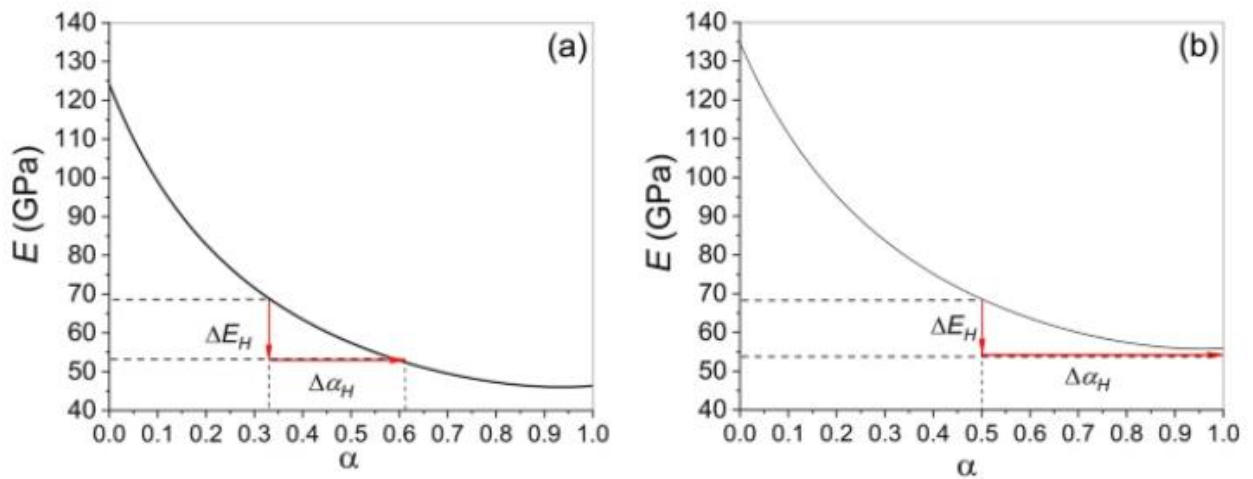


Рисунок 1.5. Залежність модуля Юнга (E) від об'ємної частки мартенситної фази (α) за температури 172 K для різних початкових параметрів матеріалу [9]

При досягненні певних критичних значень тиску в об'ємі сплавів ініціюються поліморфні (мартенситні) перетворення. Наприклад, у титанових системах спостерігається перехід пластичної гексагональної щільноупакованої α -фази у більш жорстку гексагональну Ω -фазу, що супроводжується стрімким стрибком густини та твердості матеріалу. У високоентропійних сплавах (НЕС) високий тиск здатний викликати оборотні та необоротні переходи між гранецентрованою (ГЦК) та об'ємноцентрованою (ОЦК) кубічними ґратками без зміни хімічного складу, що відкриває шлях до керування магнітними та електронними властивостями матеріалів.

Окрім чисто фазових переходів, обробка надвисоким тиском суттєво впливає на дефектну підсистему сплавів. Екстремальне стиснення призводить до:

1. Зменшення вільного об'єму на межах зерен, що гальмує процеси дифузії та рекристалізації.
2. Локального блокування руху дислокацій, що забезпечує значний ефект зміцнення матеріалу.
3. Усунення мікропор та внутрішніх дефектів лиття, що кардинально підвищує втомну міцність та пластичність виробів під час подальшої експлуатації.

Таким чином, результати аналізу сучасних світових джерел доводять, що дослідження поведінки новітніх сплавів в умовах високого гідростатичного тиску є критично важливим напрямком для створення матеріалів із екстремальними експлуатаційними характеристиками. Це, своєю чергою, ставить жорсткі вимоги до надійності, точності та безпеки автоматизованих систем керування лабораторними установками ВГТ, які покликані забезпечувати стабільне відпрацювання заданих технологічних режимів компресії та декомпресії. [9]

1.2. Аналіз сучасних підходів та архітектур побудови систем автоматизації високотискового обладнання

Аналіз науково-технічної літератури у галузі автоматизації установок високого гідростатичного тиску показує, що вибір архітектури системи керування безпосередньо залежить від масштабу, динамічних характеристик об'єкта та призначення обладнання. У великому промисловому виробництві автоматизація традиційно базується на використанні потужних програмованих логічних контролерів (ПЛК) у поєднанні з диспетчерськими системами SCADA або промисловими комп'ютерами (IPC), що працюють в операційних системах реального часу (RTOS). Такі комплекси забезпечують жорсткий детермінізм виконання керуючого циклу (зазвичай у межах від 1 до 10 мс), високу завадостійкість силових плат та апаратне резервування. З іншого боку, для лабораторних стендів та експериментальних установок застосування важких промислових ПЛК часто є економічно та технічно недоцільним через їхню закриту архітектуру та обмежену гнучкість при частій зміні конфігурації вимірювальних каналів [11]. У лабораторній практиці вагомою інженерною альтернативою виступають комп'ютерно-інтегровані системи на базі мікроконтролерів (MCU), які реалізують концепцію обробки даних безпосередньо на «кристалі» (bare-metal) або під керуванням полегшених операційних систем типу FreeRTOS. Такі підходи до розробки інформаційних технологій обробки данофбій доводять свою ефективність і в

інших складних задачах, як-от моніторинг інтенсивності трафіку [10]. Оскільки постійна часу процесу нагнітання тиску в малих об'ємах є відносно великою і вимірюється секундами, обчислювальної потужності сучасних мікроконтролерів цілком достатньо для опитування периферії. Саме такий мікроконтролерний підхід у поєднанні з комплексом спеціалізованих датчиків та персональним комп'ютером як станцією оператора є найбільш раціональним для дослідницького стенду, оскільки він дозволяє поєднати низьку вартість розробки із гнучкістю програмного налаштування. На загальній структурній схемі комп'ютерно-інтегрованої САК лабораторного рівня (див. рисунок 1.6) чітко простежується зв'язок між мікроконтролерним ядром, вимірювальними модулями та виконавчою периферією.

Побудова інформаційно-вимірювального тракту в системах високого тиску потребує детального математичного аналізу процесів перетворення сигналів. Промислові аналоги зазвичай використовують великі й дорогі інтегровані датчики з уніфікованими вихідними сигналами струмової петлі (4–20 мА). У мікроконтролерних системах лабораторного рівня моніторинг параметрів середовища реалізують за допомогою компактних тензорезистивних або п'єзоелектричних сенсорів тиску, що підключаються через прецизійні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП).



Рисунок 1.6. Блок-схема комп'ютерно-інтегрованої системи
(адаптовано з [12])

Процес перетворення аналогової напруги від датчика V_{in} у цифровий код D всередині контролера описується класичною формулою квантування:

$$D = \left\lfloor \frac{V_{in} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} * (2^n - 1) \right\rfloor, \quad (1.4)$$

де V_{max} та V_{min} — межі опорної напруги АЦП (коефіцієнт V_{ref}), а n — розрядність перетворювача. При використанні вбудованого 10-бітного АЦП ($2^{10} - 1 = 1023$) для діапазону тиску до 600 МПа теоретична роздільна здатність системи становитиме близько 0,58 МПа на один крок, що вказує на необхідність застосування зовнішніх високорозрядних АЦП (наприклад, 16-

або 24-бітних) для точних вимірювань. [13] Оскільки компресія рідини супроводжується її адіабатичним нагріванням, контур вимірювання обов'язково доповнюється швидкісними датчиками температури чи термопарами. Важливою умовою при роботі з мікроконтролерами є програмна обробка отриманих даних, адже високочастотні завади від комутації силових кіл двигуна насоса вимагають впровадження алгоритмів цифрової фільтрації. Для згладжування сигналів у літературі найчастіше рекомендують програмний фільтр ковзного середнього (Moving Average Filter), математична модель якого у дискретній формі має вигляд:

$$y[k] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x[k - i], \quad (1.5)$$

де $x[k]$ — поточне (сире) значення цифрового коду з АЦП на кроці k , $y[k]$ — відфільтроване значення, яке передається в алгоритм керування, а M — вікно фільтрації (кількість точок усереднення). Схему проходження сигналу від чутливого елемента крізь підсилювач, АЦП та програмний фільтр доцільно зобразити у вигляді функціонального блоку (див. рисунок 1.7).



Рисунок 1.7. Функціональна схема вимірювального каналу (адаптовано з [14])

Керування виконавчими механізмами в існуючих системах автоматизації функціонально поділяється на контур нагнітання та контур декомпресії. Якщо у великих промислових комплексах для зміни темпу росту тиску використовуються важкі частотно-регульовані електроприводи гідравлічних насосів, то в мікроконтролерних лабораторних стендах плавність процесів нагнітання реалізується за допомогою цифрового керування силовими ключами або реле за алгоритмом пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулювання. Розрахунок керуючого впливу $u[k]$ (наприклад, тривалості включення реле або сигналу ШІМ) на кожному дискретному кроці k здійснюється за такою математичною моделлю:

$$u[k] = K_p * e[k] + K_i * T_s \sum_{j=0}^k e[j] + \frac{K_d}{T_s} * (e[k] - e[k - 1]), \quad (1.6)$$

де $e[k] = P_{set}[k] - P[k]$ — поточна помилка регулювання (різниця між заданим та реальним тиском), T_s — період дискретизації системи, а K_p , K_i , K_d — відповідно пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти налаштування регулятора[15]. Особлива автомобільна та інженерна увага в літературі приділяється автоматизації контуру зливу, оскільки різке падіння тиску викликає кавітаційний знос запірної арматури та руйнує гнучку упаковку зразків через швидке розширення мікробульбашок повітря. Для вирішення цієї проблеми як у промислових ПЛК, так і в лабораторних системах застосовують голчасті вентилі з кроковими двигунами чи сервоприводами. Це дозволяє мікроконтролеру крок за кроком змінювати кут повороту штока вентиля, відпрацьовуючи експоненціальний характер зміни густини стиснутої води і забезпечуючи плавне декомпресійне скидання. Невід'ємною частиною архітектури залишається система протиаварійного захисту (інтерлоків), яка у випадку мікроконтролерів реалізується через механізм апаратних переривань (Interrupts), що миттєво знеструмлюють приводи при спрацюванні кінцевих вимикачів або перевищенні граничного тиску $P > P_{max_safe}$.

Висновок до першого розділу

У першому розділі було здійснено комплексний огляд технології обробки надвисоким гідростатичним тиском (ВГТ) та проаналізовано існуючі підходи до автоматизації відповідного лабораторного обладнання. Було розглянуто фундаментальні принципи методу паскалізації, який базується на законі Паскаля та принципі Ле Шательє-Брауна, дозволяючи створювати рівномірні напруження в діапазоні від 100 до 1000 МПа. Також проведено огляд застосування технології у харчовій промисловості для деструкції патогенної мікрофлори при збереженні ковалентних зв'язків продукту, у матеріалознавстві для ізостатичного пресування, а також у фармакології та кріобіології.

Значну увагу приділено термодинамічному та фізико-хімічному аналізу процесів. Проаналізовано зміну реологічних властивостей робочих рідин при екстремальних тисках, зокрема явища втрати умовної нестисливості зі зменшенням об'єму на 12–15 %, зворотного адіабатичного нагрівання та експоненційного зростання динамічної в'язкості. Досліджено фазову діаграму стану води та визначено межі стабільності рідкої фази, що є критично важливим для встановлення зон безпечної експлуатації та запобігання утворенню високотискових модифікацій льоду (типів VI та VII), які можуть призвести до небезпечного заклинювання арматури.

Встановлено, що суттєва нелінійність динамічних властивостей об'єкта регулювання під час компресії та декомпресії робить ручне або напіваавтоматичне керування стендом неефективним і вкрай небезпечним. Доведено гостру необхідність впровадження прецизійної комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування. Така система повинна вирішувати задачі динамічної адаптації швидкості нагнітання, програмного формування експоненціального профілю декомпресії для мінімізації кавітаційного зносу та забезпечення миттєвого багаторівневого протиаварійного захисту (інтерлоків) у реальному часі.

Для реалізації цих завдань було проведено порівняння промислових та лабораторних архітектур систем керування. За результатами аналізу для дослідницького стенду найбільш раціональним визнано використання мікроконтролерів замість важких промислових програмованих логічних контролерів (ПЛК), що дозволяє поєднати низьку вартість розробки із гнучкістю програмного налаштування. Окреслено вимоги до інформаційно-вимірювального тракту, що включають необхідність застосування високорозрядних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), алгоритмів програмної цифрової фільтрації сигналів, зокрема фільтра ковзного середнього, та використання пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) закону регулювання для прецизійного керування виконавчими механізмами.

Отже, проведений у першому розділі аналіз термодинамічних процесів та інженерних ризиків повністю обґрунтовує необхідність відмови від ручного керування. Отримані висновки слугують надійним теоретичним фундаментом для подальшого проєктування апаратної і програмної частини мікроконтролерної системи автоматизації лабораторного стенду.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛАБОРАТОРНИМ СТЕНДОМ

2.1. Загальна архітектура лабораторного стенду як об'єкта автоматизації

Для проєктування ефективної системи автоматичного керування (САК) необхідно попередньо визначити апаратний склад, кінематичні зв'язки та гідродинамічні характеристики фізичного обладнання. Лабораторний стенд високого гідростатичного тиску являє собою комплексний мехатронний об'єкт, у якому процеси генерації механічного зусилля, передачі гідравлічної енергії та цифрового контролю тісно взаємопов'язані.

З інженерної точки зору архітектуру експериментального стенду можна функціонально розділити на три базові підсистеми:

- **Силовий (генеруючий) блок:** відповідає за перетворення електричної енергії мережі у гідравлічну енергію потоку рідини під високим тиском.
- **Технологічний блок (робоча камера):** ізольований товстостінний простір, де безпосередньо реалізується ізостатичне стиснення досліджуваних зразків.
- **Інформаційно-керуючий контур:** комплекс мікроконтролерного обладнання, датчиків та виконавчої арматури, що забезпечує заданий алгоритм паскалізації та протиаварійний захист.

Оскільки динаміка зміни тиску в робочій камері є суттєво нелінійною, система автоматизації повинна мати змогу оперативно втручатися в процес нагнітання. Для цього виконавчі механізми стенду повинні підтримувати можливість плавного, безступеневого регулювання. Серцем силового блоку, що безпосередньо сприймає керуючі впливи від системи автоматики і формує гідравлічний напір, є головний приводний агрегат. Саме його конструктивні

особливості та механіка регулювання продуктивності визначають вибір кінцевих алгоритмів керування.

2.2. Насос гідравлічний регульований

Основним джерелом гідравлічної енергії в системі є триплунжерна установка. Згідно із загальним компонованням (рис. 2.1), насос 1 та приводний асинхронний електродвигун 2 об'єднані в єдиний агрегат і з'єднані між собою клинопасовою передачею. Вибір пасової передачі зумовлений необхідністю демпфування вібрацій та згладжування динамічних ударів, що виникають під час робочих ходів плунжерів.

Базовим несучим елементом конструкції виступає масивна сталева рама 3, на якій жорстко встановлений сам насос. Електродвигун монтується на окремій рухомій плиті 4, яка, у свою чергу, також базується на рамі 3. Для забезпечення оптимальної передавальної здатності приводу передбачено механізм натягу: за допомогою спеціального регульовального гвинта 5 плита разом із двигуном може переміщуватися напрямними рами відносно осі насоса, що дозволяє оперативно компенсувати витягування ременів під час експлуатації. З метою дотримання вимог охорони праці та запобігання потраплянню сторонніх предметів у рухомі частини приводу, пасова передача повністю закрита захисним металевим кожухом 6.

Керування об'ємною подачею робочої рідини є ключовою функцією системи. Регулювання продуктивності насоса здійснюється за допомогою спеціалізованого механізму регулювання 7. Конструктивно він складається з трьох незалежних керуючих роликів, оснащених зручними рукоятками та гнучкими тросами типу «Боуден». Кінематичний зв'язок реалізовано наступним чином: один кінець гнучкого троса жорстко кріпиться (рис. 2.1, вид 1) безпосередньо до зубчастої рейки відповідної насос-форсунки, що змонтована в корпусі насоса. Інший кінець троса фіксується на зовнішній циліндричній поверхні керуючого ролика.

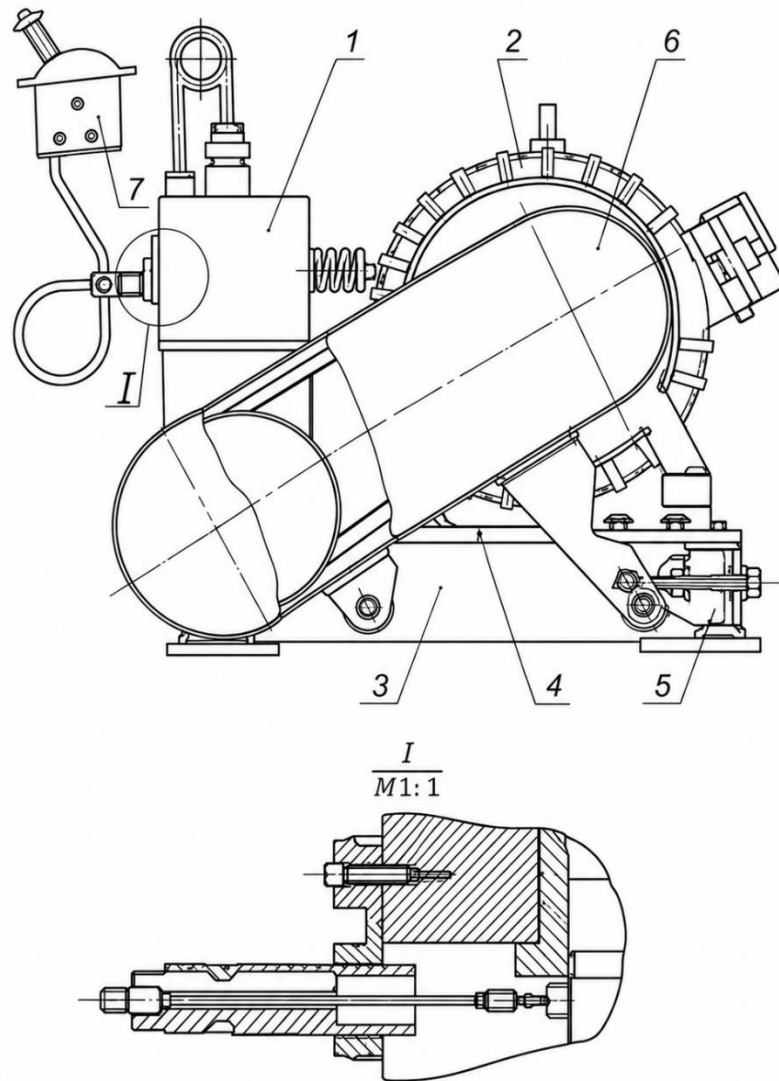


Рисунок 2.1. Загальний вид насосу

Обертання рукоятки оператором трансформується у лінійне переміщення сталевого троса всередині захисного обплетення. Це, у свою чергу, викликає поздовжнє переміщення рейки насос-форсунки, що безпосередньо веде до зміни її миттєвої продуктивності. З технічної точки зору, переміщення рейки змушує плунжер насос-форсунки обертатися навколо своєї осі. Оскільки на циліндричній поверхні плунжера профрезеровано спеціальний гвинтовий скіс (кромку), поворот плунжера відносно перепускного отвору в гільзі змінює активний хід стиснення. Таке інженерне рішення дозволяє плавно, безступенево та високоточно змінювати

об'єм рідини, що нагнітається, безпосередньо під час роботи насоса, не зупиняючи електродвигун.

2.2.1. Конструкція та принцип дії насоса

Внутрішня архітектура гідравлічного насоса (Додаток А, ДП.ПБ-з21.10.1720.01.000.СБ) є складною багатокомпонентною системою. Її базовими елементами є масивний литий корпус 1 та верхня кришка 2. Для забезпечення абсолютної співвісності деталей при складанні, корпус і кришка точно фіксуються відносно один одного за допомогою центруючих штифтів 3 і 4, після чого надійно стягуються двома силовими болтами 5.

До основних робочих вузлів насоса належить кулачковий вал 6, який сприймає крутний момент від шківів та встановлений на двох жорстких опорах, реалізованих на базі радіально-упорних кулькових підшипників 7. Гідравлічна схема агрегату також включає допоміжний паливний шестерний насос 8 (у зборі), що виконує функцію підпірного насоса низького тиску, та блок передачі механічного зусилля, який складається з трьох роликів штовхачів 9. Безпосереднє нагнітання рідини здійснює блок високого тиску, представлений трьома модифікованими насос-форсунками 10. Особливістю їхньої конструкції є те, що стандартний розпилювач сошліфований, а замість нього інтегровано живильні штуцери зі зворотними пружинами, три фільтруючі елементи та спеціальний колектор високого тиску для об'єднання робочих потоків. Крім того, для забезпечення належної експлуатації установки передбачено відповідні елементи обслуговування: мастильний щуп 12 для візуального контролю рівня картерної оливи, різьбову пробку 13 для планового зливу мастила, а також еластичну армовану манжету 14 для надійної герметизації вихідного кінця вала.

Важливою конструктивною особливістю механіки є дезаксаж: осі насос-форсунок та штовхачів штучно зміщені відносно центральної осі кулачкового вала на 3,5 мм. Таке інженерне рішення дозволило суттєво знизити шкідливі бічні вектори від поздовжньої сили, що виникають при набіганні кулачка на

ролик. Як наслідок, кардинально зменшено сили тертя та знос напрямних втулок і самих штовхачів, що підвищує загальний ресурс агрегату. Правильний напрямок обертання кулачкового валу (якщо дивитися з боку привода) — виключно проти годинникової стрілки.

Для забезпечення надійної герметизації стиків під дією екстремальних пульсуючих навантажень, між корпусом насос-форсунки та її прямою втулкою встановлена спеціальна мідна прокладка 15, що зминається, товщиною $1,5 \pm 0,1$ мм. Крім функції ущільнення, ця прокладка відіграє роль прецизійного калібрувального елемента. За умови стандартної висоти штовхача 9 разом із регулювальним болтом (49,3 мм), товщина прокладки суворо задає крайнє нижнє (мертве) положення контактної площини штовхача насос-форсунки. З урахуванням прокладки 15, ця площа знаходиться на відстані рівно 37,7 мм від опорного бурта насос-форсунки. Цей геометричний параметр є критичним, оскільки він визначає геометричний початок нагнітання (оптимальний момент упорскування) робочої рідини в колектор.

2.2.2. Гідродинаміка робочого циклу

Процес генерації високого тиску базується на узгодженій роботі двох гідравлічних контурів. Під час обертання кулачкового валу профіль кулачка набігає на ролик, передаючи колосальне механічне зусилля через штовхач 9 на робочий плунжер насос-форсунки 10. У результаті цього робоча рідина, замкнена в надплунжерному просторі (плунжерній парі), зазнає інтенсивного стиснення.

Контур низького тиску (живлення): Робоча рідина забирається з основного бака по всмоктувальній магістралі. Далі вона проганяється допоміжним шестерним насосом 8, який створює постійний підпірний тиск у межах 0,2...0,5 МПа. Цей потік прокачується крізь внутрішні канали всіх трьох насос-форсунок, забезпечуючи їх стабільне наповнення, охолодження та змащування прецизійних пар.

Контур високого тиску (нагнітання): Під час робочого ходу плунжера частина рідини відсікається гвинтовим скосом плунжерної пари, стискається до робочих значень і через нагнітальний клапан виштовхується в лінію нагнітання. По трунці 11 вона потрапляє до загального колектора високого тиску (який інтегрований у кришку 2), звідки спрямовується безпосередньо до робочої камери (споживача).

Та частина робочої рідини, яка не була захоплена плунжером у процесі нагнітання (об'єм перепуску), безпечно скидається через отвори гільзи та зливається назад у бак через колектор низького тиску, який виконаний у нижній частині корпусу 1, та відповідну відвідну магістраль.

2.2.3. Схема електрична принципова та система безпеки

Установка розрахована на підключення до стандартної промислової трифазної мережі змінного струму (380 В) за допомогою силового штепсельного гнізда X1.

Головним виконавчим механізмом є асинхронний трифазний електродвигун М. Комутація його силових кіл здійснюється за допомогою електромагнітного пускача ПМ1, що забезпечує надійне замикання контактів та захист від падіння напруги. Оперативне керування пускачем (подача струму на його котушку) здійснюється з панелі керування за допомогою тумблера S1.

Враховуючи роботу обладнання під високим тиском та наявність відкритих рухомих частин пасової передачі, схему доповнено апаратною системою протиаварійного блокування (інтерлоками). У ланцюг керування котушкою магнітного пускача ПМ1 послідовно врізані кінцеві мікроперемикачі S2 та S3. Вони механічно пов'язані з дверцятами захисного столу-кожуха установки. У разі несанкціонованого відкривання хоча б однієї з дверей під час роботи насоса, відповідний мікроперемикач миттєво розриває ланцюг живлення пускача ПМ1. Це призводить до автоматичного знеструмлення електродвигуна М та екстреної зупинки процесу нагнітання, що гарантує безпеку оператора згідно з чинними нормами охорони праці.

2.3. Апаратура високого тиску

Як було розглянуто в попередньому підрозділі, регульований гідравлічний насос забезпечує первинну генерацію тиску в системі. Однак при використанні високого тиску в області екстремально низьких або високих температур відкриваються широкі перспективи для з'ясування природи магнітних перетворень і виявлення нових фазових переходів. Безперервне підключення зразка до працюючого насоса в таких умовах є технологічно неможливим. Вирішенням цієї проблеми є використання спеціалізованої апаратури — автономних клапанних камер високого тиску, які дозволяють застосувати метод «консервування» (або «заморожування») тиску. Суть методу полягає в тому, що високий гідростатичний тиск створюється первинним насосним обладнанням за кімнатної температури, фіксується всередині камери, після чого установка від'єднується від магістралі й охолоджується до низьких температур.

2.3.1. Автономні камери високого тиску

При використанні високого тиску в області низьких температур відкриваються широкі перспективи для з'ясування природи магнітних перетворень, а також для виявлення нових фазових переходів.

Однак під час проектування та виготовлення апаратури високого тиску для магнітних вимірювань за низьких температур виникає низка складнощів. По-перше, це вибір матеріалу для дослідження магнітних характеристик речовини в області низьких температур і високих тисків. Найбільш прийнятними з погляду магнітних і міцнісних характеристик у діапазоні низьких температур і високих тисків до 3,0 ГПа є термооброблена берилієва бронза БрБ-2 та сплав 40ХНЮ. Вони немагнітні й мають достатню міцність. [18]

По-друге, виникають труднощі, пов'язані з тим, що пластичність середовищ, які передають тиск у діапазоні низьких температур, різко зменшується. Навіть гелій, який не твердне аж до абсолютного нуля за

атмосферного тиску, при тиску 2,5 МПа твердне за температур, близьких до 0 К; при 14,0 МПа — за температури 4,2 К; а при тиску 0,18 ГПа — за температури 20,4 К. Ці труднощі були подолані як шляхом конструктивних рішень під час створення апаратури високого тиску, так і завдяки вдалому вибору рідини, що передає тиск, — ПЕС-5.

У дослідженнях застосовувався метод отримання тиску в області низьких температур, який отримав назву «консервування» або «заморожування» тиску. Суть методу полягає в тому, що високий гідростатичний тиск створюється за кімнатної температури, після чого установку охолоджують до низьких температур.

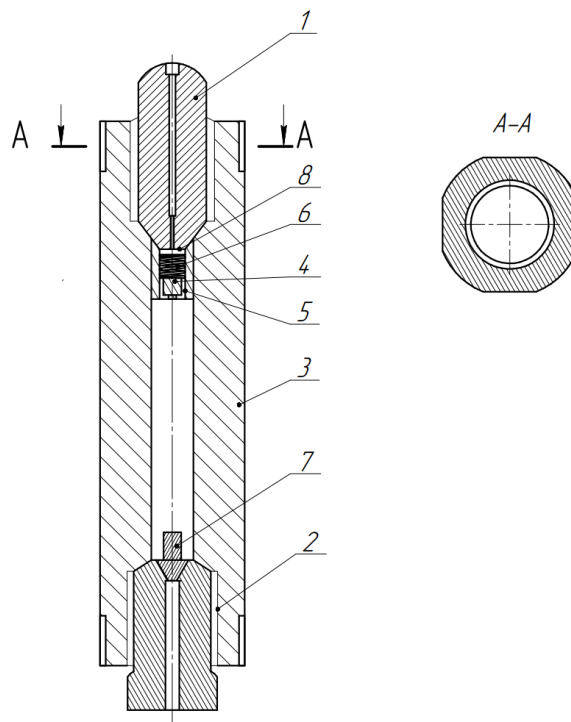


Рисунок 2.2. Будова автономної клапанної камери високого тиску: 1 – клапанна пробка, 2 – пробка електровводу, 3 – корпус, 4 – клапан, 5 – клапанна коробка, 6 – пружина, 7 – ущільнювальний конус, 8 – ущільнювальні кільця.

Вибір цього методу отримання високих тисків у діапазоні низьких температур зумовлений насамперед тим, що пластичність середовища, яке передає тиск, у області низьких температур відіграє незначну роль, оскільки тиск створюється в температурному діапазоні, де пластичність середовища є високою.

В основу розробок було покладено клапанну камеру високого тиску, оскільки вона має низку переваг, зокрема значний корисний внутрішній об'єм, що суттєво перевищує за тих самих зовнішніх габаритів і максимального робочого тиску корисний внутрішній об'єм камер типу «циліндр–поршень», зручність у роботі та відсутність вибагливих рухомих ущільнень. Камеру було модифіковано відповідно до умов нашого експерименту. внутрішню будову наведено на рис. 2.2. Камера складається з таких основних деталей: клапанної пробки 1, пробки електровводу 2 та безпосередньо корпусу циліндра високого тиску 3. Тиск фіксується в камері клапаном 4, розташованим у клапанній коробці 5 та підтиснутим пружиною 6. Клапанна коробка 5 кріпиться до пробки 1 за допомогою різьбового з'єднання з дрібною різьбою. Ущільнення електровводу здійснюється зворотним конусом 7 з кутом розкриття 60° , в основі якого є штир із різьбою для кріплення вимірювальних комірок. Ущільнення пробок 1 і 2 відносно корпусу 3 здійснюється кільцями 8.

Більш детально конструкцію електровводу і такого, що містить максимально можливу кількість провідників, необхідних для вимірювання магнітних характеристик, зображено на рис. 2.3. Як правило, електроввід монтується в наскрізному каналі камери високого тиску, у нашому конкретному випадку — в наскрізному каналі пробки електровводу. Проводи, що вводяться в камеру високого тиску, найчастіше ущільнюються між двома поверхнями. Очевидно, що кількість провідників, розташованих в один шар без перетинання на ущільнюваних поверхнях, буде максимальною за їх максимального віддалення відносно осі каналу. У цьому випадку максимальне

число провідників, розміщених у каналі,

дорівнює

$$N = \pi \left(\frac{D}{d} - 1 \right), \quad (2.1)$$

де D і d — діаметри каналу та провідника в ізоляції відповідно.

Часто виникає необхідність підведення всередину камери високого тиску значної величини електричного струму для живлення нагрівача, вимірювання опору тощо. У цьому випадку в розрахунок слід ввести поряд із кількістю інформаційних каналів N_1 також певну кількість провідників для струмовводу N_2 .

Тоді

$$N = N_1 + N_2, \quad (2.2)$$

де N_2 можна визначити зі співвідношення

$$N_2 = \frac{8I}{j\pi d^2}, \quad (2.3)$$

де I — сила струму нагрівача, j — густина струму.

Спираючись на формули (2.1–2.3), можна розрахувати діаметр провідників в ізоляції d , виходячи із загальної кількості провідників N , необхідних для введення струму заданої густини та забезпечення потрібної кількості інформаційних каналів.

Було розроблено спеціальну технологію виготовлення електровводу, що містить N провідників. Основна складність під час виготовлення електровводу полягала в забезпеченні коаксіальності провідників відносно осі каналу. Її було подолано таким чином. На заздалегідь виготовлений або підібраний каркас (ми використовували скляну трубку або фторопластовий циліндр) щільно, виток до витка, без натягу намотуються N витків дроту ПЕЛШО діаметром d , розрахункове значення якого отримано з формул (2.1–2.3), і злегка просочуються клеєм БФ-2. Після висихання клею утворене з провідників кільце розрізається по твірній циліндра, у результаті чого отримується плоска стрічка, що легко знімається з циліндричної поверхні каркаса та містить N провідників. Отримана стрічка обгортається навколо центрального стрижня електровводу, як правило, це мідний провід у лаковій

ізоляції діаметром $D_1 \approx (D - 2d - 0,3)$ мм. Стрічка обгортається навколо центрального стрижня з дотриманням таких вимог: шар клею, що з'єднує провідники, має бути звернений у бік центрального електровводу, а вісь стрижня повинна бути напрямлена паралельно осям провідників, тобто кожен провідник має торкатися твірної циліндричної поверхні стрижня, а не обвивати його. Після цього стрічка фіксується за допомогою двох нитяних кілець на краях центрального стрижня, щільно примотується до нього й злегка зволожується спиртом або ацетоном. Клей частково розчиняється, і після висихання розчинника стрічка міцно утримується на стрижні. Таким чином отримують заготовку електровводу. Далі заготовка вводиться в канал пробки електровводу, провідники розводяться один відносно одного в зоні фіксувальних кілець, із розведених провідників видаляються залишки клею тампоном, злегка змоченим в ацетоні або спирті, і провідники розташовуються симетрично по ущільнювальних поверхнях. Після цього між ущільнювальними поверхнями та розміщеними на них провідниками наноситься шар епоксидного компаунду.

Епоксидний компаунд складається з епоксидної смоли ЕД-20 — 100 мас. ч., дибутилфталату — 10 мас. ч., поліетиленполіаміну — 7–15 мас. ч. та наповнювача (TiO_2 або M_2O_3), який додається до смоли до консистенції густого мастила. Час полімеризації компаунду становить 12–14 год при кімнатній температурі або 5–6 год при температурі 60°C .

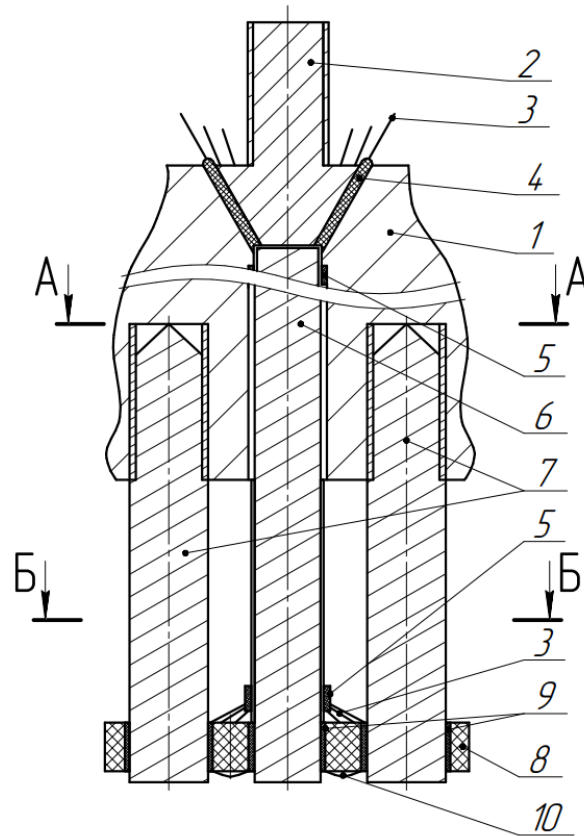
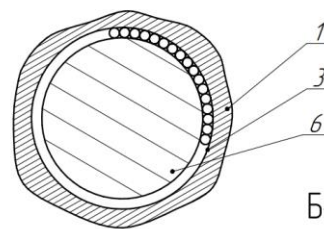
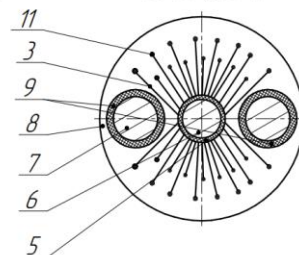


Рисунок 2.3. Електроввід у камеру високого тиску. 1 – пробка електровводу автономної клапанної камери, 2 – ущільнювальний конус, 3 – ущільнювані провідники, 4 – епоксидний компаунд, 5 – фіксувальні кільця, 6 – центрувальний стрижень, 7 – стійки, 8 – склотекстолітова колодка, 9 – пістони, 10 – перемичка, 11 – пістони вимірювальної лінії.

A-A (40:1)



Б-Б (10:1)



1 – парний провід, 11 – непарний провід.

Конструкцію електропроводу в зібраному вигляді наведено на рис. 2.3. Для підвищення механічної міцності в корпус пробки електропроводу 1 вгвинчено дві стійки 7, на які надягнуто склотекстолітову колодку 8. Колодка закріплена паянням через розташовані на ній пістони 9. В один із пістонів 9 також впаяно центрувальний стрижень 6 електропроводу, що дає змогу здійснювати його електричне з'єднання з масовим проводом і корпусом 1 за допомогою перемички 10. Провідники 3 розведені біля нижнього фіксувального кільця 5 і розпаяні в пістони 11, також розташовані на колодці 8. До пістонів 11 підпаяні підвідні проводи інформаційних каналів кабелю та струмових каналів нагрівача, а до пістонів 9 – масовий провід кабелю. Провідники 3 з іншого кінця електропроводу ущільнені між поверхнями конічного отвору 1 та зворотного конуса 2 за допомогою епоксидного компаунду 4. Розпайка кабелю до колодки 8 на стійках 7 дає змогу підвищити механічну міцність електропроводу в місці його з'єднання з кабелем. Останнім часом конструкцію електропроводу було модернізовано: від колодки 8 відмовилися, а провідники безпосередньо розпаюють на роз'єм типу СРІ9, який надійно працює в діапазоні температур 4,2–300 К. Вилка роз'єму кріпиться в спеціальному перехіднику, який, своєю чергою, фіксується до корпусу пробки електропроводу 1 різьбовими шпильками, що вкручуються на місце стійок 7.

Електропроводи описаної конструкції, які ми застосовували протягом багатьох років, надійно працювали в діапазоні тисків до 1,6 ГПа та в інтервалі температур 4,2–340 К. За діаметра каналу 2 мм у камеру без особливих труднощів вводиться 28–30 проводів ПЕЛШО-0,1, опір яких відносно корпусу перевищує 5 ГОм. Через три паралельно з'єднані провідники можна вводити в камеру електричний струм для живлення нагрівача потужністю близько 60 Вт при напрузі 100 В.

Було також здійснено спробу використати автономні клапанні камери високого тиску для робіт у діапазоні температур вище кімнатних. Слід зазначити, що в літературі відсутні приклади застосування автономних камер високого тиску, виготовлених із мідно-берилієвих сплавів, для вимірювань

при температурах понад 400 К. За зовнішнього нагрівання камер виникають певні перешкоди: порушується робота електровводу, оскільки зазвичай для його ущільнення при температурах не вище кімнатних використовують епоксидні компаунди; крім того, відбувається зниження міцності бронзи, з якої виготовлено корпус камери високого тиску. Додатково при нагріванні до 670 К руйнується звичайна емалева ізоляція провідників і стає неможливою робота манганінового манометра.

Використовувана нами автономна камера має внутрішній корисний об'єм близько 3 см³ при власній довжині 120 мм та зовнішньому і внутрішньому діаметрах відповідно 32 і 8 мм, що дало змогу сконструювати достатньо просту у виготовленні комірку для локального нагрівання зразка до 670 К у відносно теплоізований частині робочого об'єму камери, в якій можна створювати високі гідростатичні тиски до 1,6 ГПа.

Як середовище, що передає тиск за підвищених температур, використовувалася термостійка кремнійорганічна рідина № 5. Завдяки максимальному просторовому рознесенню всередині камери манометра й нагрівача, а також зовнішньому термостатуванню стінок камери в рідинному термостаті U-10 (виробництва НДР), вдалося досягти того, що нагрів манганінового манометра і внутрішніх стінок камери протягом 15-хвилинного нагрівання до 670 К не перевищував 340 К. При зменшенні граничної температури, але зі збільшенням часу нагрівання, зазначене значення температури не зростало.

На рис. 2.4 наведено конструкцію високотемпературної комірки для автономних клапанних камер високого тиску. Зовнішній діаметр стакану становив 7,5 мм, загальна довжина конструкції від конічного ущільнення 2 до кришки 12 дорівнювала 50 мм. Внутрішній об'єм нагрівача 9 мав діаметр 4 мм і висоту 22 мм. Комірка забезпечувала тривалу експлуатацію провідників діаметром 0,1 мм, уведених у камеру через електроввід описаної вище конструкції.

Складання комірки здійснювалося в такому порядку. Спочатку на різьбовий штир конічного ущільнення електропроводу 2 вільно надягалася тороїдальна котушка манганінового манометра 3 так, щоб провідники електропроводу знаходилися всередині отвору котушки. Провідники розводилися вбік. Потім нагвинчувався тримач 4. Необхідна кількість термопар і мідних провідників заводилася в ряд отворів 5 і 7. Нагрівач 9 щільно надягався на виступ тримача так, щоб його вихідні контакти входили в отвори 8. Оскільки в порожнині, утвореній стаканом і тримачем, температура є суттєво нижчою за температуру плавлення припою на основі олова, вихідні контакти нагрівача припаювалися до мідних провідників електропроводу. Після цього на нагрівач і тримач надягався тепло- та електроізоляційний стакан 6. На зовнішній поверхні стакана 6 були виконані пази, куди укладалася й підпаювалася до контактів 11 необхідна кількість провідників електропроводу. До контактів 11 також припаювалися провідники інформаційних каналів, що виходили з внутрішнього об'єму нагрівача через отвір 10 і паз у торці кришки 12.

Матеріалом для виготовлення тримача, стакана і кришки слугував фторопласт-4 — хімічно інертний і термостійкий при нагріванні до 670 К під тиском, технологічний у механічній обробці та з добрими тепло- й електроізоляційними властивостями.

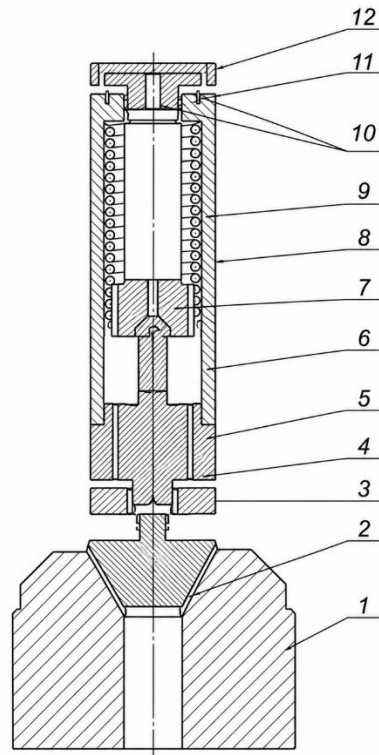


Рисунок 2.4. Високотемпературна комірка до автономної клапанної камери високого тиску: 1 – корпус пробки електровводу, 2 – ущільнювальний конус, 3 – манганіновий манометр, 4 – тримач, 5, 7 – отвори, 8 – отвори електродів печі, 9 – нагрівач, 10 – отвори, 11 – контакти, 12 – кришка.

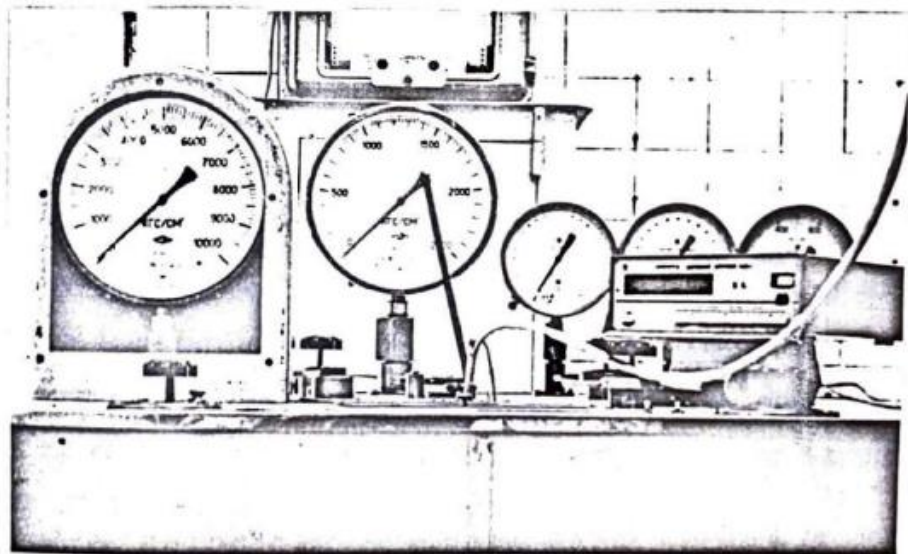


Рисунок 2.5. Зовнішній вигляд установки високого тиску УВД-15000

Нагрівач 9 виготовлявся з тонкостінної латунної обойми, обгорнутої прокладкою зі слюди, на яку в один шар намотувався нагрівач із ніхромового дроту діаметром 0,1 мм із кроком намотування близько 0,1 мм. Спіраль нагрівача зверху фіксувалася та електроізолювалася за допомогою шару склоїттики на рідкому склі. Опір нагрівача становив 150 Ом. Через три паралельно з'єднані провідники електровводу до нагрівача підводилася потужність близько 60 Вт. Різниця температур між точкою в центрі порожнини нагрівача і точкою, розташованою на 5 мм вище або нижче по його осі, не перевищувала 10 К при температурі 470 К і швидкості нагрівання $0,4 \text{ K} \cdot \text{с}^{-1}$.

Використання описаних вище експериментальних рішень перетворило автономну клапанну камеру високого тиску на універсальний інструмент для дослідження магнітних характеристик речовини за високих гідростатичних тисків до 1,6 ГПа в широкому температурному діапазоні — від 4,2 до 670 К.

2.3.2. Пристрої створення високого гідростатичного тиску

Застосування автономних клапанних камер високого гідростатичного тиску, найбільш придатних для вивчення магнітних властивостей матеріалів під тиском до 1,6 ГПа в інтервалі температур 4,2–300 К, передбачає наявність пристроїв для створення високих гідростатичних тисків, які дають змогу здійснювати закачування камер до потрібного тиску, а також зняття тиску після завершення експерименту.

Нами використовувалася промислова установка високого тиску типу УВД-15000 (Київський дослідний завод «Еталон»), пристосована для закачування автономних клапанних камер високого тиску, а також розроблений нами закачувальний пристрій, що працює спільно з будь-яким пресом зусиллям близько 0,5 МН.

Зовнішній вигляд установки для створення високих тисків типу УВД-15000 наведено на рис. 2.5. Установка УВД-15000 складається з таких основних вузлів: насоса попереднього тиску, що включає безпосередньо

насос, приводний електродвигун із понижувальним редуктором, манометр, масляний бак із фільтром і з'єднувальні трубопроводи; насоса низького тиску з меншою продуктивністю; вентиля попереднього тиску з ручним пресом; мультиплікатора; вимірювального манометра; системи трубопроводів високого та низького тиску; вихідного штуцера для безпосереднього під'єднання автономних клапанних камер високого тиску. Для герметичного під'єднання автономних клапанних камер високого тиску до установки УВД-15000 було розроблено спеціальний притискний пристрій, який дає змогу здійснювати закачування камер діаметром 20–40 мм і довжиною до 120 мм.

Конструкцію притискного пристрою наведено на рис. 2.6. Основною деталлю є корпус 1, усередині якого розташовується камера 2. Корпус 1 приєднується за допомогою різьбового з'єднання до вихідного штуцера 9 установки УВД-15000. Корпус камери високого тиску 2 на торці має чотири лиски, які входять у квадратний отвір 3 корпусу 1, що запобігає провертання камери 2 відносно корпусу 1. Притискна гайка 4 через опорний підшипник 5 діє на п'яту 6, яка, своєю чергою, забезпечує притискання штуцера камери 7 через корпус 2 до вихідного штуцера 9 установки УВД-15000.

Корпус фіксується відносно штуцера 9 за допомогою гайкового ключа за шестигранник 8. Обертання гайки 4 здійснюється за шестигранник 10. Через внутрішній отвір п'яти 6 виводяться електровводи 11 з камери високого тиску.

Деталі притискного пристрою виготовлялися зі сталі ХНГ, термообробленої до твердості HRC $\approx$ 49–51. Опорний підшипник має номер 8107.

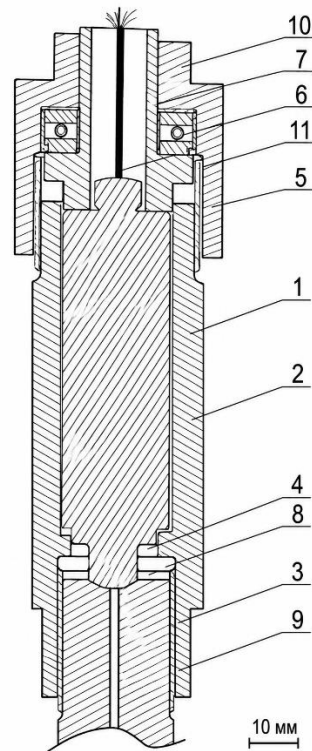


Рисунок 2.6. Притискний пристрій для автономних клапанних камер високого тиску: 1 – корпус, 2 – камера високого тиску, 3 – квадратний отвір, 4 – притискна гайка, 5 – опорний підшипник, 6 – п'ята, 7 – штуцер камери, 8 – шестигранник, 9 – штуцер УВД-15000.

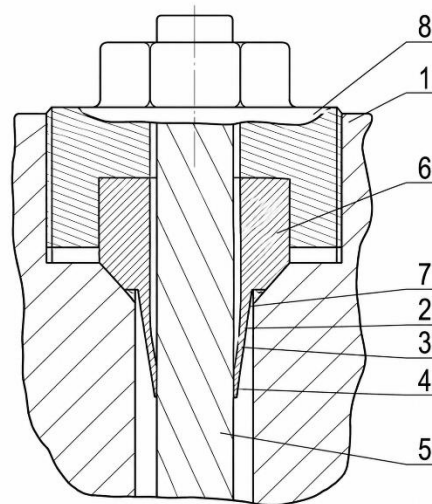


Рисунок 2.7. Ущільнювальний вузол поршня високого тиску: 1 – мультиплікатор, 2 – гільза, 3 – внутрішня конічна поверхня, 4 – крайка гільзи, 5 – поршень, 6 – напрямна втулка, 7 – ущільнювальне кільце, 8 – притискна гайка.

Притискний пристрій забезпечує надійне під'єднання автономних клапанних камер до штуцера установки УВД або закачувального пристрою і працює в діапазоні тисків до 2,0 ГПа. Тривала експлуатація притискних пристроїв цього типу спільно з установками УВД-15000 та УВДТ і описаним нижче закачувальним пристроєм показала їх високу надійність і ефективність.

Закачування рідини в камеру високого тиску здійснюється шляхом притискання штуцера камери до вихідного штуцера УВД-15000 з подальшим створенням попереднього тиску до 0,25 ГПа, закриттям вентиля попереднього тиску та наступним підвищенням тиску за допомогою мультиплікатора установки УВД до 1,5 ГПа. При знятті тиску в мультиплікаторі та магістралі попередньої закачки установки УВД автоматично відбувається закриття клапана в автономній камері високого тиску, після чого її виймають із притискного пристрою та поміщають у кріостат. Скидання тиску здійснювалося за методикою, що полягала в наступному: в канал штуцера клапанної пробки автономної камери вставлявся штовхач із пружиною, зусилля якої дещо перевищує зусилля пружини клапана. Завдяки наявності на кінці штовхача потовщення, яке входить у виточку в сферичній головці штуцера камери високого тиску, при притисканні камери до штуцера установки УВД штовхач надійно фіксується між штуцерами. При підвищенні тиску до значень, дещо більших за тиск у камері (в середньому на 30,0–70,0 МПа, що визначається робочим тиском і властивостями застосовуваної рідини), відбувається відкривання клапана штовхачем. При повільному стравлюванні тиску аж до атмосферного здійснюється розрядження камери високого тиску.

У зв'язку з тим, що тиск відкривання клапана дещо перевищує тиск, зафіксований у камері під час закачування, при роботі з тисками близько 1,5 ГПа виникає проблема зняття тиску, яку без перевищення максимальних робочих тисків установки УВД вирішити неможливо. Для отримання тисків до 2,0 ГПа було розроблено закачувальний пристрій, в основу якого покладено

ущільнювальний вузол поршня високого тиску, що працює за принципом некомпенсованої площі.

Конструкцію ущільнювального вузла поршня високого тиску, який є основною частиною закачувального пристрою, наведено на рис. 2.7. Він містить установлену в порожнині мультиплікатора 1 пружно деформовану під час складання гільзу 2 з конічною внутрішньою поверхнею 3, крайка 4 якої щільно охоплює поршень 5 для забезпечення початкового ущільнення. Напрямна втулка 6 виконана як одне ціле з гільзою 2 і ущільнюється відносно стінки мультиплікатора 1 кільцем 7. Напрямна втулка 6 притискається до стінки мультиплікатора 1 гайкою 8.

Під час проходження торця поршня 5 через крайку 4 гільзи 2 внутрішній діаметр крайки збільшується в межах пружних деформацій матеріалу, з якого виготовлено напрямну втулку і гільзу. Практично внутрішній діаметр крайки гільзи, виготовленої з термообробленої берилієвої бронзи БрБ-2, збільшується на 0,1 %. Завдяки пружній деформації крайки 4 забезпечується початкове ущільнення між гільзою 2 та поверхнею поршня 5. При підвищенні тиску стисливого середовища в порожнині мультиплікатора 1 гільза 2 пружно деформується і, прогинаючись, притискається поверхнею 3 до поверхні поршня 5. Таким чином забезпечується автоматичне додаткове ущільнення вузла в процесі підвищення тиску.

Закачувальний пристрій, виготовлений на базі описаного ущільнювального вузла, мав поршень діаметром 8 мм, зазор між поршнем і напрямною втулкою близько 0,02 мм, довжина гільзи становила 8 мм. Напрямна втулка і гільза виготовлялися з бронзи БрБ-2, термообробленої до твердості $HRC = 38-41$; поршень виготовлявся зі сталі ШХ-15, термообробленої до твердості 58–60 HRC і шліфованої зовні. Ущільнювальне кільце виготовлено з БрБ-2 твердістю 20–30 HRC. Корпус мультиплікатора виготовлено зі сталі ХВГ твердістю 45 HRC; з аналогічного матеріалу виготовлена й притискна гайка.

Штуцер мультиплікатора вкручувався в кутник-підставку, який мав штуцер для під'єднання камер високого тиску за допомогою описаного вище притискного пристрою. Кутник-підставка давав змогу під'єднувати камери високого тиску до мультиплікатора перпендикулярно до вертикальної осі, що значно зменшувало вертикальні габарити закачувального пристрою з камерою та дозволяло здійснювати закачування в невеликих пресах із зусиллям близько 0,5 МН.

Робота із закачувальним пристроєм зводиться до заповнення порожнини мультиплікатора рідиною, що передає тиск (у нашому випадку ПЕС-5), при піднятому поршні. Після цього мультиплікатор збирається, встановлюється під прес і здійснюється закачування камер високого тиску. Зняття тиску нічим не відрізняється від описаного вище.

2.4. Вимірювання тиску

В основу системи вимірювання тиску було покладено стандартну методику вимірювання залежності опору манганінового манометра від температури та тиску. Ще проведені Іцкевич дослідження показали слабку взаємну залежність баричного та термічного коефіцієнтів опору манганінового датчика тиску. Проведені останнім часом додаткові дослідження дали змогу стверджувати, що взаємна залежність баричного та термічного коефіцієнтів опору манганінового манометра призводить до невизначеності вимірювань тиску, яка не перевищує 40 МПа в діапазоні тисків до 1,6 ГПа в інтервалі температур від гелієвих до кімнатної. [19]

Опір манганінового манометра вимірювався за чотириточковою схемою. Реєстрація показань манганінового манометра здійснювалася як функція температури за різних початкових тисків, створених за кімнатної температури. Із отриманого сімейства кривих віднімався температурний хід манганінового манометра при атмосферному тиску. Отримані в результаті перерахунку сімейства кривих показують істинний (з урахуванням зазначеної вище невизначеності) тиск у камері в інтервалі температур від 4,2 до 300 К.

Характерна зміна тиску всередині камери при зміні температури від гелієвих до кімнатної для нашої автономної камери, заповненої рідиною ПЕС-5, наведена на рис. 2.8.

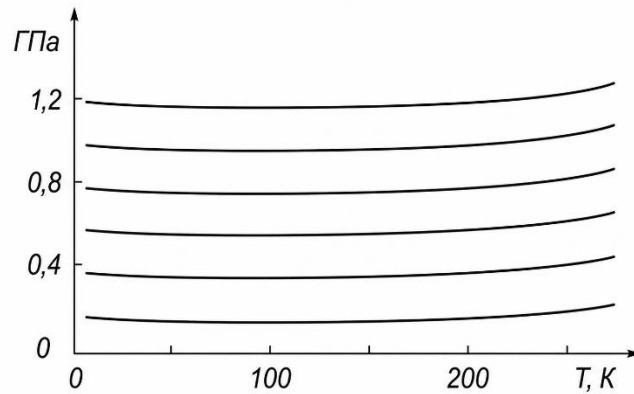


Рисунок 2.8. Характерна зміна тиску всередині автономної камери при охолодженні

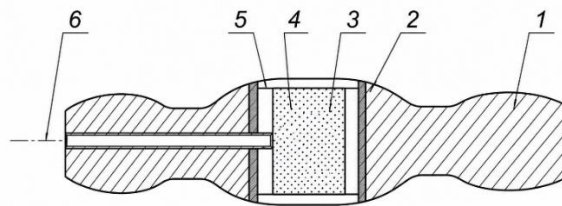


Рисунок 2.9. Комірка для термобаричної обробки:

1 — катленітовий контейнер, 2 — нагрівач, 3 — ізолювальна склянка, 4 — зразок,
5 — кришка, 6 — термопара

2.5. Комутаційно-вимірювальний вузол системи нагнітання

Для побудови ефективної замкненої системи автоматичного керування (САК) гідростатичним тиском недостатньо лише забезпечити генерацію зусилля насосом. Критично важливим елементом інформаційно-керуючого контуру є наявність надійного зворотного зв'язку, що вимагає безперервного моніторингу параметрів робочого середовища. З цією метою в гідравлічну магістраль між силовим блоком та автономними робочими камерами

інтегрується спеціалізований комутаційно-вимірювальний вузол, серцем якого є вентиль високого тиску (Додаток А, ДП.ПБ-з21.10.1720.05.000.СБ).

У контексті автоматизації стенду даний вентиль виконує подвійну функцію. По-перше, він працює як прецизійний виконавчий механізм, що забезпечує тонке дроселювання потоку, кероване скидання тиску (декомпресію) та надійне відсікання робочих камер від насосної станції. По-друге, масивний корпус вентиля конструктивно використовується як вимірювальний колектор (маніфольд).

Встановлення первинних перетворювачів (датчиків тиску та температури) безпосередньо в корпус або на фланці вентиля є найбільш раціональним інженерним рішенням. Таке компонування дозволяє мінімізувати кількість "мертвих" зон у гідравлічній магістралі, зменшити транспортне запізнювання вимірювального сигналу та уникнути встановлення додаткових трійників, які є потенційними місцями розгерметизації при тисках понад 1,0 ГПа. Таким чином, конструкція вентиля безпосередньо впливає на точність та швидкодію всієї системи автоматизованого контролю.

2.6. Конструкція та принцип дії вентиля високого тиску

Конструкція вентиля розрахована на роботу в умовах надвисоких динамічних навантажень, де робочий діапазон тисків становить від 120 до 150 МПа. Основним тримальним елементом вихідного каскаду є двошаровий циліндр високого тиску, який для запобігання руйнуванню вузла внаслідок дії внутрішніх напружень виготовлено за технологією циліндричної запресовки. Внутрішня втулка запресована в зовнішню обойму з розрахунковим гарантованим натягом за технологією автофретування, завдяки чому отримані попередні напруження стиснення компенсують розтягувальні зусилля від робочого тиску середовища. Механічне з'єднання камери низького тиску з двошаровим циліндром здійснюється за допомогою масивної накидної гайки, яка забезпечує жорсткість і герметичність стику поршневої та шпіндельної груп.

Герметизація рухомих з'єднань пристрою реалізована за принципом деформаційного самощільнення та примусового підтискання. У вузлі ущільнення втулки за відсутності початкового осьового зусилля на ущільнювальні кільця робоче середовище під дією власного тиску зміщує втулку, проникає у зазори пакета кілець і виходить у дренажний напрямок. Для запобігання цьому явищу застосовано композитну структуру пакета ущільнень, що складається з чергування латунних елементів, капролону та вискоеластичних полімерів. Паралельно з цим блок автоматичного підтискання у вигляді обойми забезпечує динамічне ущільнення рухомого штока. Конструктивно в нижній частині обойми виконано упорний уступ із заходним пазом, що переходить у фіксуючий зуб, який при створенні осьового зусилля керування деформує та затискає пакети ущільнювальних кілець, повністю блокуючи витoki середовища вздовж лінії руху голки.

Вентиль функціонує за принципом гідравлічного мультиплікатора тиску, де керуюче зусилля формується завдяки різниці робочих площ поршневої групи. Камера низького тиску сформована всередині втулки, де розміщено великий поршень. Робоче середовище низького тиску подається через канал підведення у надпоршкову порожню керування, виконану у тілі кришки корпусу. Тиснувши на торець поршня, рідина створює значне осьове зусилля, яке передається на підп'ятник та рухомий шток, що безпосередньо утворює камеру високого тиску всередині циліндра. За рахунок співвідношення великої площі поршня низького тиску та малої площі торця штока відбувається кратне масштабування сили, при якому робочий хід штока становить від 2 до 3 мм. Гідравлічна олива з виходу мультиплікатора під тиском до 150 МПа спрямовується за двома напрямками, де перший йде безпосередньо на робочу камеру затвора, а другий виходить на контрольний манометр системи.

Для прецизійного керування витратою та тиском робочого середовища застосовано голчастий затвор, у якому регулювання здійснюється за рахунок лінійного переміщення конусної голки штока відносно нерухомого сидла.

Процес керування затвором є повністю збалансованим. Під час закриття затвора керуючий тиск подається у верхню частину арматури на поршень керування. Для забезпечення надійної посадки голки у сідло та пом'якшення гідравлічного удару, тиск у порожнині поршня керування повинен перевищувати поточний тиск у зоні голки. Олива з каналу кришки тисне на поршень, який зміщує буксу, що примусово затискає пакети кілець голчастого затвора і виключає зворотне виштовхування штока під дією внутрішнього тиску системи.

Зворотне переміщення голки при відкритті затвора ускладнене дією високого протитиску середовища, площею контакту затвора та значними силами тертя у пакетах автопідтискання, тому пряме відведення привода без підготовки може призвести до заклинювання або пошкодження робочих поверхонь. Для безпечного відкриття реалізується спеціальний алгоритм автоматичного керування, при якому тиск у надпоршневій порожнині підп'ятника та на поршні керування знижується плавно і пропорційно. Одночасно з цим зменшується тиск у блоці автопідтискання голчастого затвора, що послаблює зусилля затискання кілець і мінімізує силу тертя. Під дією залишку високого тиску з боку проточного каналу циліндра виникає виштовхувальна сила, яка плавно переміщує голку назад, голка зміщує за собою поршень, тиск у робочій зоні локально падає до безпечного експлуатаційного значення, і поршень остаточно повертається у вихідне положення.

2.7. Теоретичні відомості розробки

Для програмно-апаратної реалізації обчислювальних алгоритмів та збору даних у даному дипломному проєкті використано платформу Arduino. Вона являє собою універсальний архітектурний комплекс, базовими компонентами якого виступають мікроконтролерні плати вводу-виводу на основі процесорів архітектури Atmel AVR та інтегроване середовище розробки (IDE). Подібні апаратно-програмні комплекси є універсальними і

також успішно застосовуються для медичного моніторингу, зокрема для діагностування рівня чадного газу та карбоксигемоглобіну [20-22]. Програмне забезпечення функціонує на базі мов Processing/Wiring, які є синтаксично близькими до високорівневої мови C++. Використання даної платформи дозволяє проєктувати ефективні мікропроцесорні системи автоматизації, мінімізуючи затрати часу на низькорівневе конфігурування регістрів мікроконтролера завдяки наявності стандартизованих програмних інтерфейсів (API).

Інтегроване середовище розробки поєднує в собі інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та високу гнучкість при побудові складних систем керування. Прикладні програми (скетчі) мають модульну структуру, а можливості мови легко розширюються шляхом підключення зовнішніх C++ бібліотек. Кросплатформеність програмного забезпечення забезпечує сумісність із операційними системами Windows, macOS та Linux. Завдяки відкритому вихідному коду (Open Source) програмної частини та публікації принципових апаратних схем під ліцензією Creative Commons, платформа має широку інженерну підтримку, що дозволяє створювати кастомні модифікації модулів за відносно низької собівартості рішень.

Конструктивною особливістю плат Arduino є інтеграція ключових елементів обв'язки безпосередньо на друкованій платі. До них належать лінійний стабілізатор напруги (5 В) та кварцовий генератор тактової частоти (16 МГц). Наявність попередньо прошитого в мікроконтролер завантажувача (bootloader) нівелює потребу у використанні зовнішніх апаратних програматорів під час завантаження коду. Усі модифікації плат оснащені щонайменше одним послідовним портом UART, який слугує для прошивки та підтримання зв'язку з персональним комп'ютером або іншими елементами САК.

У розробленій системі автоматизації застосовано плату Arduino Uno, яка базується на 8-бітному мікроконтролері Atmel AVR ATmega328. Апаратні ресурси плати включають:

- 32 КБ флеш-пам'яті (Flash) для зберігання виконуваного коду (з яких 0.5 КБ зарезервовано під завантажувач);
- 2 КБ оперативної пам'яті (SRAM) для динамічних змінних;
- 1 КБ енергонезалежної електрично перепрограмованої пам'яті (EEPROM) для довготривалого збереження калібрувальних констант та коефіцієнтів регулятора.

Доступний стек вводу-виводу дозволяє ефективно використовувати цифрові та аналогові канали мікроконтролера у зовнішніх електричних колах, а також застосовувати виводи з підтримкою широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) для формування аналогових керуючих впливів на виконавчі пристрої гідравлічного стенду.

Головною функціональною задачею обчислювального ядра мікроконтролера у складі інформаційно-керуючого контуру є математична реалізація заданого закону регулювання. Закон регулювання визначає алгоритмічну залежність зміни керуючого впливу від величини похибки (відхилення поточного значення регульованої величини від заданої уставки). Вибір та динамічне налаштування закону регулювання безпосередньо визначають показники якості САК: статичну точність, швидкодію, рівень перерегулювання та стійкість системи.

В інженерній практиці та теорії автоматичного керування найбільшого поширення набули п'ять класичних законів регулювання:

1. Двопозиційний (релейний) — керуючий вплив набуває лише двох дискретних значень залежно від знаку похибки;
2. Пропорційний (П-закон) — керуючий сигнал лінійно залежить від поточного відхилення;
3. Інтегральний (І-закон) — керуючий вплив формується пропорційно накопиченій у часі інтегральній сумі похибки, що дозволяє усунути статичну помилку;
4. Диференціальний (Д-закон) — реагує на швидкість зміни похибки, забезпечуючи упереджувальний вплив;

5. Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД-закон) — комбінований алгоритм, який інтегрує переваги трьох попередніх законів і є найбільш універсальним інструментом для керування динамічними об'єктами у промисловості.
- 6.



Рисунок 2.10. Плата Arduino UNO [23]

Характеристики: [23]

- Мікроконтролер : ATmega328
- Робоча напруга контролера:
- Вхід USB: 5V
- Вхід VCC: 5V
- Вхід Vin: 7,5V-12V
- Цифрові входи/виходи: 14 (6 з них ШІМ)
- Аналогові входи: 6
- Флеш-пам'ять програм: 32Кб
- Оперативна пам'ять: 2Кб

- EEPROM пам'ять - 1Кб
- Тактова частота: 16 МГц

Для вимірювання статичного та динамічного тиску рідини або повітря в магістралях низького тиску чи ресиверах установки застосовано високоточний датчик MS5803-14BA від компанії MEAS Switzerland. Цей пристрій є новим поколінням альтиметрів/датчиків тиску високої роздільної здатності з інтерфейсами I2C та SPI.

Датчик оптимізований для роботи у низьковольтних системах із робочою напругою від 1.8 до 3.6 В. Діапазон вимірювання абсолютного тиску становить від 0 до 14 бар (1.4 МПа). Ключовою особливістю датчика є наявність вбудованого 24-бітного АЦП наднизького споживання з сигма-дельта архітектурою. Завдяки високій розрядності перетворення, роздільна здатність вимірювання тиску досягає 0.012 мбар, що дозволяє фіксувати мікроскопічні пульсації тиску в контурі.

Конструктивно сенсор виконано у спеціалізованому керамічному корпусі з міцною металевою кришкою. Внутрішня порожнина з п'єзорезистивним вимірювальним елементом заповнена антикорозійним захисним гелем. Це інженерне рішення захищає напівпровідникову структуру від прямого контакту з рідинами (включаючи воду та гідравлічні оливи) та агресивними середовищами, гарантуючи довгострокову стабільність характеристик.

Датчик є енергоефективним пристроєм: у режимі очікування (sleep mode) споживання струму не перевищує 0.6 мкА, а під час пікового аналого-цифрового перетворення воно зростає лише до 12.5 мкА. Окрім тиску, модуль здійснює компенсацію температурної похибки завдяки інтегрованому датчику температури з точністю вимірювання ± 0.8 °C. Інформаційний обмін із мікроконтролером здійснюється за вибором користувача через завадостійкі цифрові шини I2C або SPI. Робочий температурний діапазон сенсора повністю збігається з промисловим стандартом (від -40 до +85 °C).



Рисунок 2.11. Герметичний датчик тиску (повітря та рідини) MS5803-14BA [24]

Характеристики датчика MS5803-14BA: [24]

- Робоча напруга: від 1,8 до 3,6 В
- Піковий струм живлення: 1,4 мА
- Робочий діапазон вимірюваного тиску: - від 0 до 14 бар
- Роздільна здатність: 1/0,6/0,4/0,3/0,2 мбар
- Інтерфейс: I2C та SPI
- Захист датчика: гель

Для контролю кутових або лінійних переміщень механічних вузлів (наприклад, ходу штока регулювального вентиля чи положення елементів приводу роликів механізму натягу) використано електронний модуль на основі аналогового датчика Холла SS49E та подвійного компаратора на чіпі LM393.

Сенсор живиться напругою в діапазоні від 3.0 до 6.5 В і споживає струм до 10 мА. Принцип роботи полягає в генерації електричного сигналу при проходженні крізь напівпровідникову пластину магнітного потоку. Чутливість датчика становить 1.4 мВ/Гс (мілівольт на Гаус). За відсутності зовнішнього магнітного поля вихідна аналогова напруга у стані спокою становить рівно половину напруги живлення (при живленні 5 В вона дорівнює ~2.5 В), а при появі магнітного поля північного чи південного полюсів напруга лінійно збільшується або зменшується відповідно.

Функціонал модуля розширено завдяки платі узгодження, яка забезпечує два типи вихідного сигналу:

1. Аналоговий вихід (АО): безпосередньо транслює лінійну напругу з датчика на аналоговий вхід мікроконтролера для точного розрахунку відстані до магніту.
2. Цифровий вихід (DO): формується за допомогою інтегрованого компаратора LM393. Він видає логічний нуль або одиницю при досягненні певного рівня магнітного поля.

Поріг спрацьовування цифрового каналу регулюється за допомогою багатообертового підлаштовного резистора (потенціометра) на платі, що дозволяє апаратно налаштовувати датчик на кінцеві положення механізмів без залучення ресурсів мікроконтролера. Модуль оснащений світловою індикацією: один світлодіод сигналізує про наявність напруги живлення, а другий відображає поточний стан цифрового виходу. Датчик адаптований до суворих температурних умов експлуатації від -40 до $+85$ °C.

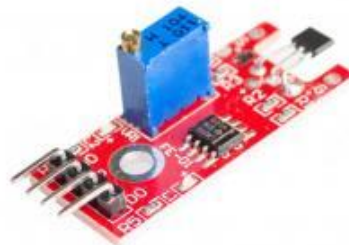


Рисунок 2.12. Модуль датчика холла SS49E [25]

Характеристики датчика SS49E: [25]

- Висока якість датчика
- Маленькі розміри: 36ммx16мм
- Монтажний отвір для кріплення модуля діаметром 3 мм
- Світлодіоди Power і Sensor
- Напруга живлення від 3.3 - 5.5V

Для моніторингу умов навколишнього середовища всередині захисного кожуха приводу чи в боксі з електронними компонентами системи автоматики (де критично важливо контролювати вологість для упередження конденсації та перегріву) застосовано цифровий датчик температури та вологості SHT20 від компанії Sensirion.

Сенсор працює в діапазоні напруг від 3.3 до 5 В та підключається до мікроконтролера через стандартний інтерфейс I2C. Модуль є повністю цифровим: аналогові сигнали з ємнісного сенсора вологості та датчика температури з розщепленою забороненою зоною (band-gap) проходять обробку на кристалі та конвертуються у цифрові коди з роздільною здатністю 12 біт для вологості та 14 біт для температури. Датчик має повну взаємозамінність, оскільки проходить індивідуальне фабричне калібрування, а відповідні коефіцієнти зашиті в його неперезаписувану пам'ять.

Метрологічні характеристики пристрою мають такі показники:

- Діапазон вимірювання відносної вологості повітря: від 0 до 100% з точністю $\pm 3\%$;
- Діапазон вимірювання температури: від -40 до $+125$ °C з високою точністю ± 0.3 °C;
- Максимальний час відгуку (динамічна характеристика) становить 8 с, що забезпечує необхідну швидкодію для захисних систем вентиляції чи підігріву шаф автоматики.

Енергетичні режими датчика адаптовані для безперервного моніторингу: споживання струму в режимі сну (sleep mode) становить усього 0.15 мкА, а під час активної фази вимірювання не перевищує 300 мкА. Дане технічне рішення гарантує високу стабільність вимірювальних каналів та завадостійкість цифрової шини при роботі силового гідравлічного обладнання стенду.



Рисунок 2.13. Модуль датчика температури та вологості SHT20 I2C [26]

Характеристики датчика SHT20: [26]

- Діапазон вимірювання температури: -40 до +120 °C
- Точність діапазону температури (10-60 °C): +/- 0.4 °C
- Діапазон вимірювання відносної вологості: 0 - 100 %
- Точність діапазону відносної вологості (0-60 °C): 5%
- Напруга живлення: 2.1 - 3.6 В
- Тип інтерфейсу: I2C
- Час відгуку вимірювання вологості: 8 с
- Ел.потужність споживання: мінім. 5 uW (при напрузі 2.4 В)

2.8. Розробка функціональної схеми автоматизації

Комплекс технічних засобів автоматизації інтегровано безпосередньо у вузол регулювання потоку. На схемі відображено ключові компоненти технологічного устаткування. Регулюючий високонапірний вентиль, позначений позицією 1, виступає основним об'єктом контролю та безпосереднім робочим органом. За рахунок лінійного переміщення внутрішнього плунжера він змінює площу прохідного отвору для рідкого або газоподібного середовища. Електропривід виконавчого механізму, позначений як М1, представляє собою реверсивний електричний привід, змонтований безпосередньо на корпусі вентиля. Він здійснює механічне

переміщення штока у вертикальній площині за допомогою перетворення обертального руху ротора двигуна в поступальний рух запірного елемента.

Для забезпечення гнучкого та точного цифрового керування системою, ФСА побудовано за принципом децентралізованого збору інформації за допомогою первинних мікроелектронних вимірювальних перетворювачів, що працюють у режимі монтажу по місцю. Згідно з логікою побудови схеми «зліва направо», у систему інтегровано три незалежні вимірювальні канали, кожен з яких фіксує окремий параметр процесу дроселювання.

Перший вимірювальний канал призначений для контролю мікроклімату і позначається індексом ТТ/МТ 1-1. Технічно він реалізований на базі цифрового датчика Sensirion SHT20, який встановлено всередині щита керування (або під захисним кожухом установки). Цей прилад здійснює безперервне вимірювання температури навколишнього повітря в діапазоні від мінус 40 до плюс 125 градусів Цельсія, а також його відносної вологості від 0 до 100 відсотків. Моніторинг цих параметрів є критично важливим для упередження перегріву електронних компонентів системи автоматики та запобігання випаданню конденсату на платах мікроконтролера і реле, що гарантує стабільну роботу інформаційно-керуючого контуру.

Другий вимірювальний канал реалізує контур зворотного зв'язку за положенням штока і позначається як ZT 2-1. У ньому використовується лінійний датчик положення на ефекті Холла Honeywell SS49E з високою чутливістю та аналоговим виходом. Датчик змонтований по місцю у механічному вузлі зв'язку між приводом та клапаном. Він реагує на переміщення магнітного поля постійного магніту, закріпленого на рухомому штоку вентиля, забезпечуючи контроль ходу штока в межах плюс-мінус 10 мм. Даний контур надає системі інформацію про реальний ступінь відкриття вентиля, що дозволяє реалізувати точний замкнений алгоритм регулювання та виключити механічні люфти привода.

Третій вимірювальний канал виконує вихідний контроль абсолютного тиску і позначається індексом РТ 3-1. Технічною основою цього контуру є

високоточний напівпровідниковий датчик абсолютного тиску TE Connectivity MS5803-14BA, захищений спеціальним антикорозійним гелем від прямого агресивного впливу робочого середовища. Датчик встановлено на вихідному трубопроводі після регулюючого вентиля для фіксації фінального результату зміни тиску в діапазоні від 0 до 15 бар. Дані з цього контуру є ключовими для оцінки ефективності процесу та формування керуючого сигналу.

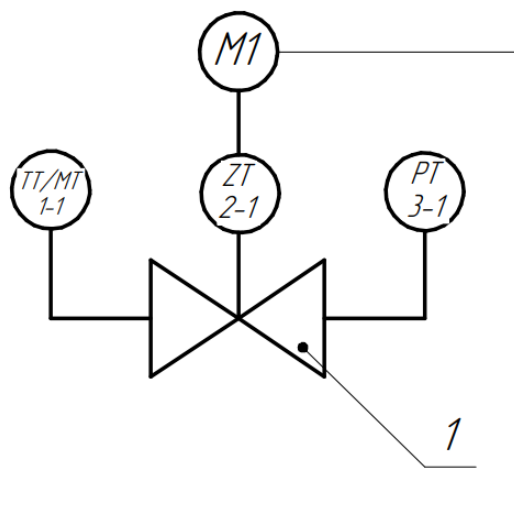


Рисунок 2.14. Технологічна схема ФСА: 1 – Вентиль високого тиску; M1 - Електропривід виконавчого механізму; 1-1 - Модуль датчика температури та вологості SHT20; 2-1 - Модуль датчика холла SS49E; 3-1 - Герметичний датчик тиску MS5803-14BA

Усі три первинні сенсори підключені за допомогою ліній зв'язку до центрального апаратно-обчислювального комплексу, винесеного в окрему захищену зону — на щит керування. Цей комплекс на схемі позначається загальним індексом УС 1-2. Центральним елементом логічної обробки інформації виступає комбіноване обладнання, що складається з промислового інтелектуального логічного реле Schneider Electric Zelio Logic та інтегрованого мікроконтролерного шлюзу збору даних на базі архітектури Arduino Uno з

чіпом ATmega328. Весь цей комбінований блок розрахований на живлення 24 В постійного струму і має загальну масу 0,25 кг.

Складність підключення первинних сенсорів у даній системі полягає в тому, що чіпи SHT20 та MS5803 передають дані по високошвидкісному цифровому послідовному протоколу I2C, який фізично не підтримується стандартними входами промислових ПЛК. Для вирішення цієї проблеми в межах вузла UC 1-2 застосовано мікроконтролерний модуль узгодження інтерфейсів Arduino Uno. Він виступає апаратним перекладачем: опитує датчики по шині I2C, зчитує аналоговий сигнал з датчика Холла SS49E, фільтрує високочастотні завади за допомогою програмних алгоритмів і нормалізує отримані масиви даних.

Далі оброблена і перерахована інформація передається на базовий модуль логічного реле Zelio Logic. Програма контролера порівнює поточні технологічні параметри температури, положення штока та тиску із заданими оператором уставками. У разі виникнення похибки регулювання або відхилення тиску від норми, контролер формує вихідну команду для зміни положення виконавчого механізму і надсилає її на електропривод вентиля.

Для забезпечення безпеки експлуатації гідравлічного вузла до схеми інтегровано контур ручного керування та блокування живлення з позначенням HS 4-1. Технічно він реалізований у вигляді кулачкового двопозиційного апаратного перемикача режимів Eaton Moeller серії TO-1-8200/E, який монтується на дверцятах щита керування і має масу 0,1 кг. Перемикач працює у двох фіксованих положеннях нуль та один, що відповідає режимам вимкнено та увімкнено. Він інтегрований безпосередньо в електричне коло живлення всієї системи автоматизації та привода двигуна. Цей апарат дозволяє оператору миттєво перемикати систему між автоматичним режимом роботи ПЛК та ручним сервісним керуванням, а також здійснювати аварійне блокування і знеструмлення виконавчого механізму M1 у разі виникнення критичних або позаштатних ситуацій на трубопроводі високого тиску.

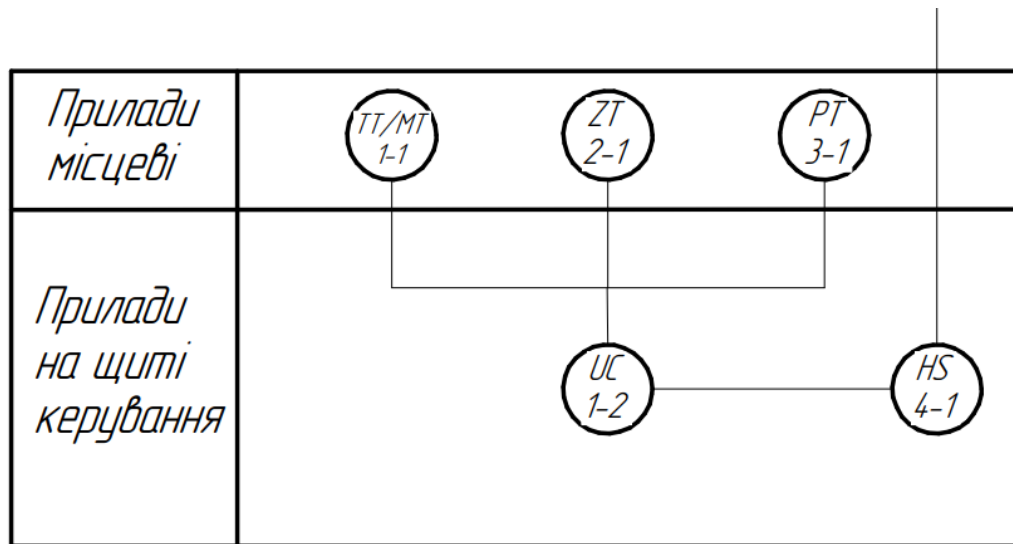


Рисунок 2.15. Прилади місцеві та прилади на щиті: 1-1 - Модуль датчика температури та вологості SHT20; 2-1 - Модуль датчика холла SS49E; 3-1 - Герметичний датчик тиску MS5803-14BA; 1-2 – Arduino Uno; 4-1 - Кулачковий двопозиційний апаратний перемикач режимів (ручний/автомат)

2.9. Опис алгоритму функціонування автоматизованої системи

Функціонально-алгоритмічна структура розроблюваної автоматизованої системи керування лабораторним стендом високого гідростатичного тиску базується на принципі циклічного моніторингу параметрів середовища, багаторівневого захисту обладнання та прецизійного цифрового регулювання. Логіку взаємодії програмних та апаратних засобів під час виконання технологічного процесу відображено на структурній схемі алгоритму (рис. 2.16).

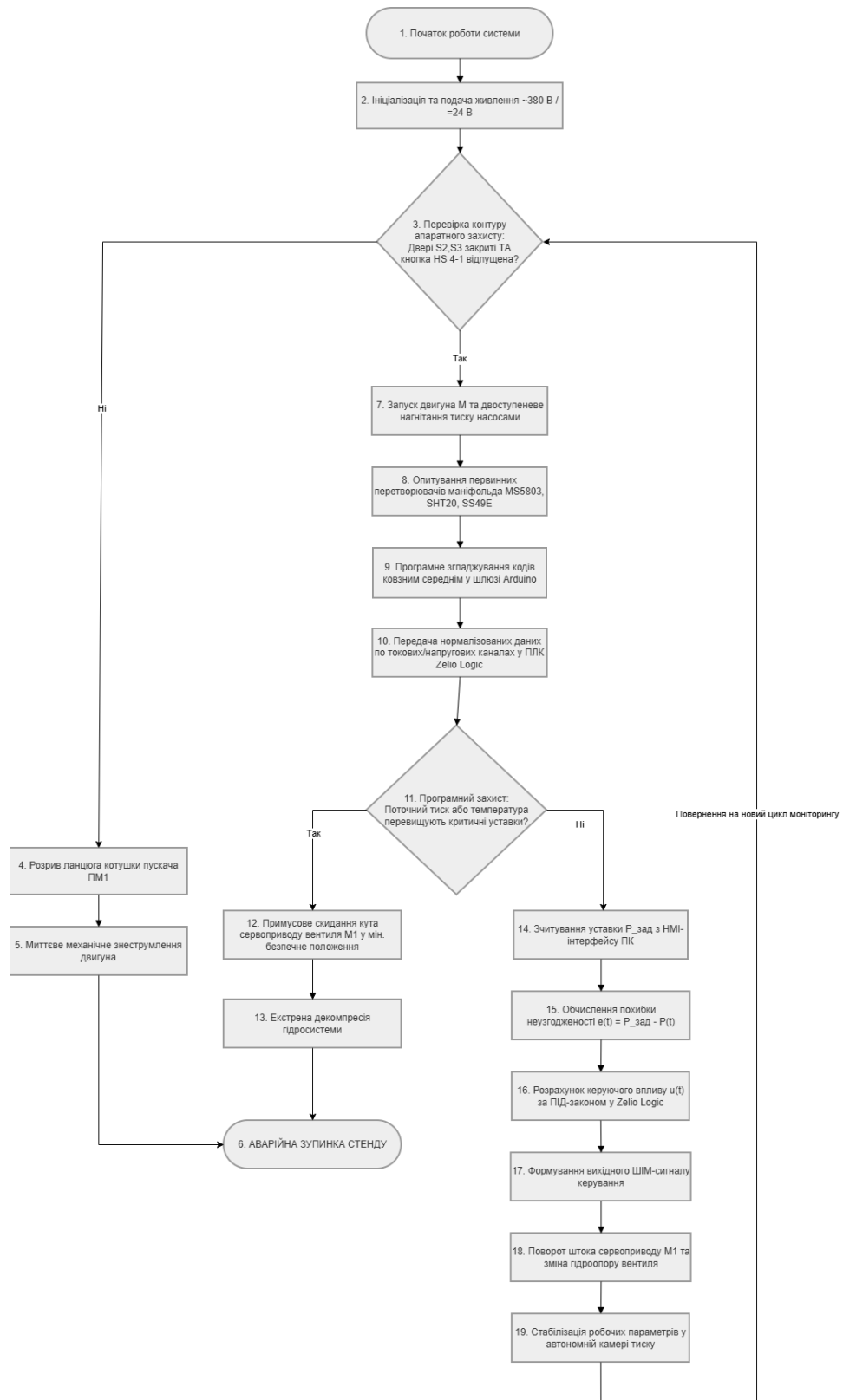


Рисунок 2.16. Структурна схема алгоритму роботи автоматизованої системи

На початковому етапі відбувається запуск системи, ініціалізація програмних модулів мікроконтролерного шлюзу та логічного реле, а також подача напруги живлення ~ 380 В на силові ланцюги та ~ 24 В на інформаційно-керуючий контур. Одразу після запуску алгоритм переходить до виконання безумовної апаратної перевірки умов безпеки стану. Якщо кінцеві вимикачі захисного кожуха дверей S2, S3 замкнені (що свідчить про безпечне закриття камери), а кулачковий перемикач аварійної зупинки HS 4-1 перебуває у відпущеному стані, система дозволяє увімкнення магнітного пускача ПМ1. У разі порушення будь-якої з цих умов ланцюг живлення котушки пускача миттєво розривається на фізичному рівні, що призводить до механічного знеструмлення асинхронного двигуна М та переведення стану в режим аварійної зупинки незалежно від стану обчислювальних процесорів.

При успішному проходженні первинного контролю безпеки алгоритм активує силову частину, ініціюючи запуск двигуна та двоступеневе нагнітання тиску насосами. Після цього система входить у безперервний замкнений цикл моніторингу та регулювання. Крок збору даних передбачає паралельне опитування первинних перетворювачів маніфольда: цифрових датчиків абсолютного тиску MS5803-14BA та мікроклімату SHT20 (через шину I2C), а також аналогового датчика Холла SS49E, який фіксує просторове положення штока вентиля. Отримані первинні коди надходять на мікроконтролерний шлюз Arduino Uno, де реалізовано алгоритм цифрової фільтрації «ковзного середнього». Це дозволяє очистити вимірювальні сигнали від високочастотних завад та амплітудних пульсацій, що виникають через циклічну роботу плунжерів насоса. Нормалізовані дані з виходу шлюзу передаються на вхідні канали промислового логічного реле Schneider Electric Zelio Logic.

Перед розрахунком параметрів керування алгоритм виконує другий ешелон захисту — програмний. Логічне реле безперервно порівнює поточні значення тиску в системі та температури ущільнень із гранично допустимими уставками. При виявленні критичного перегріву чи перевищення тиску

контролер блокує автоматичне регулювання і запускає підпрограму захисту, яка примусово скидає кут сервоприводу вентиля М1 у мінімальне безпечне положення. Це забезпечує екстрену декомпресію гідросистеми та повну зупинку стенду.

У штатному режимі функціонування логічне реле зчитує задане значення тиску $P_{\text{зад}}$, встановлене оператором через НМІ-інтерфейс персонального комп'ютера. Обчислювальний блок порівнює значення уставки з фактичним профільтрованим тиском $P(t)$ і визначає динамічну похибку неузгодженості $e(t) = P_{\text{зад}} - P(t)$. На основі цієї похибки за закладеним у пам'ять Zelio Logic ПД-законом розраховується величина керуючого впливу $u(t)$ та формується вихідний ШІМ-сигнал. Виконавчий сервопривід М1 сприймає цей сигнал і повертає шток регулюючого вентиля на відповідний кут. Зміна гідравлічного опору магістралі забезпечує точне дроселювання потоку робочої рідини, що призводить до прецизійної стабілізації робочого тиску безпосередньо в автономній камері. Після цього алгоритм замикає цикл зворотного зв'язку і повертається до початкової точки перевірки апаратного захисту для виконання наступного такту керування.

2.10. Віртуальне моделювання та верифікація інформаційно-керуючого контуру в середовищі Tinkercad

Для попередньої перевірки працездатності розробленого програмного забезпечення, валідації алгоритмів керування та аналізу динаміки системи без ризику пошкодження дорогого фізичного обладнання було здійснено комп'ютерне моделювання електронної схеми. Як інструментальне середовище обрано хмарну платформу автоматизованого проєктування *Autodesk Tinkercad Circuits*. Дане середовище дозволяє проводити інтерактивну симуляцію схемотехнічних рішень у режимі реального часу, поєднуючи емуляцію апаратної обв'язки мікроконтролера ATmega328 з виконанням завантаженого вихідного коду.

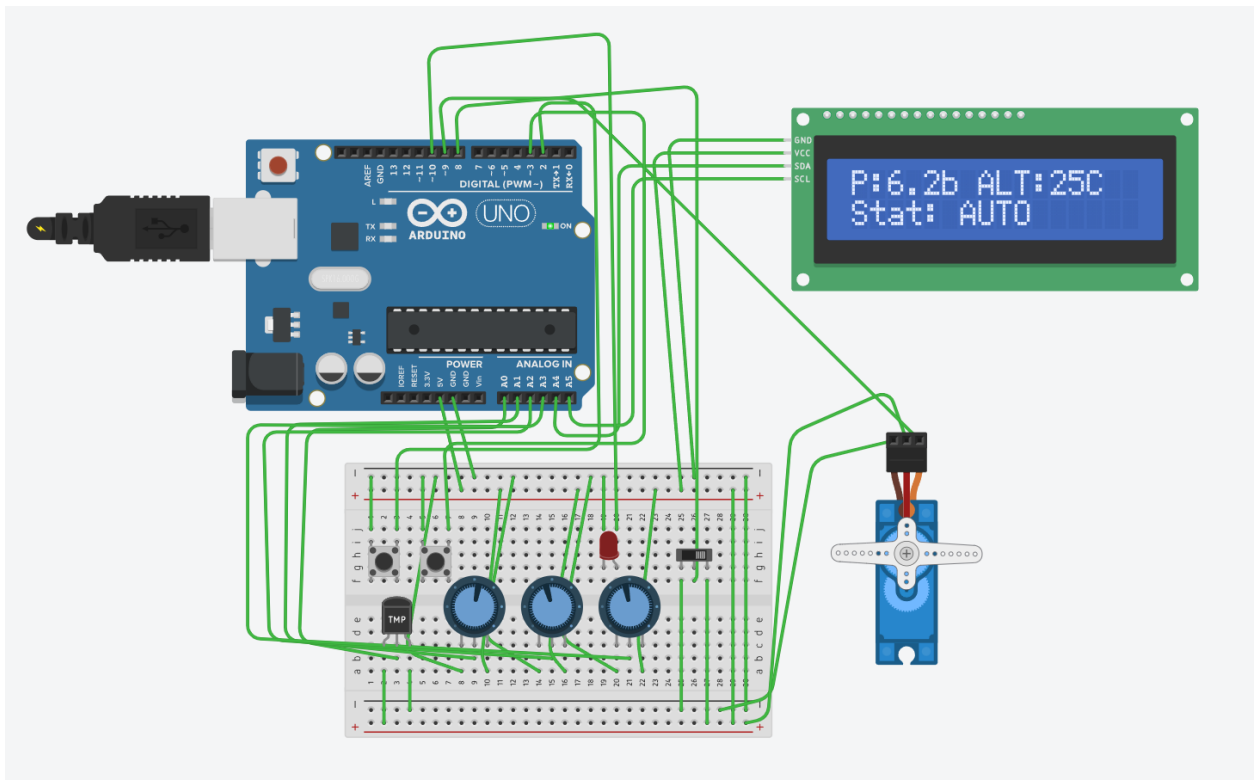


Рисунок 2.17. Загальний вигляд віртуального макету інформаційно-керуючого контуру в середовищі розробки Autodesk Tinkercad

Під час створення віртуального макету постає класична проблема обмеженості стандартних бібліотек онлайн-симуляторів, у яких відсутні високоспеціалізовані цифрові та наукові первинні перетворювачі, такі як датчик абсолютного тиску MS5803-14BA або датчик макросередовища SHT20. Проте з точки зору теорії автоматичного керування, для верифікації логіки роботи контролера важлива не фізична природа чи протокол передачі даних сенсора, а його динамічна поведінка та характер зміни вихідної величини. З огляду на це, у симуляції було застосовано метод електричного еквівалентування, де реальні датчики замінені прецизійними потенціометрами. Таке інженерне припущення є повністю виправданим через можливість гнучкої імітації сигналів різного типу.

По-перше, для імітації лінійного аналогового сигналу датчика Холла SS49E потенціометр вмикається за схемою регульованого дільника напруги. Це дозволяє подавати на аналоговий вхід мікроконтролера сигнал у діапазоні від 0 до 5 В, що ідеально відтворює зміну положення магніту або штока

вентиля. По-друге, з метою емуляції технологічних параметрів цифрових датчиків тиску та вологості, які працюють через інтерфейс I2C, у тестовій версії програмного коду для симулятора блоки зчитування цифрової шини були замінені на стандартну функцію аналогового читання. Обертання ручки потенціометра у такому випадку моделює реальний фізичний процес, зокрема падіння або зростання гідростатичного тиску в камері чи зміну температури навколо компонентів. Це дає змогу оператору вручну створювати динамічні збурення в системі та перевіряти реакцію програмних алгоритмів, таких як ПД-регулятор чи система апаратних інтерлоків, на відхилення від заданої уставки або вихід параметрів за критичні межі безпеки.

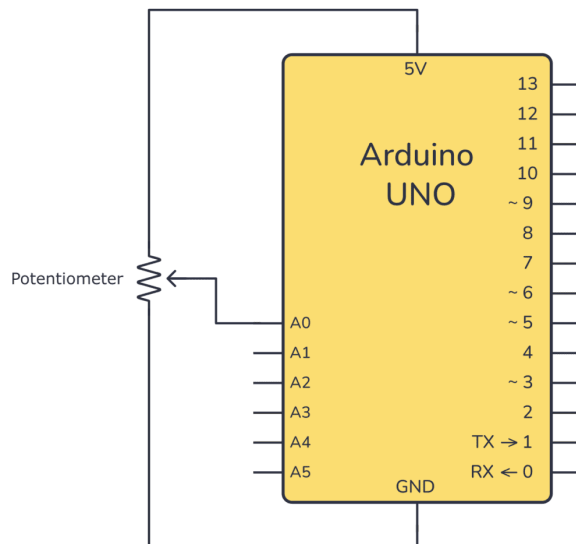


Рисунок 2.18. Схема електрична еквівалентного заміщення первинних перетворювачів за допомогою потенціометричних дільників напруги

Загальний процес функціонування та моделювання розробленої системи автоматичного керування відбувається за чітким циклічним алгоритмом, що виконується в межах головної програмної петлі мікроконтролера. На початковому етапі оператор або віртуальне середовище змінює положення потенціометрів, імітуючи поточний стан вимірювальних каналів тиску, температури та положення штока вентиля. Після цього мікроконтролер виконує зчитування сигналів з відповідних аналогових каналів за допомогою

вбудованого аналого-цифрового перетворювача та здійснює математичне масштабування і цифрову фільтрацію отриманих даних для їх перерахунку в реальні фізичні одиниці, такі як бари та градуси Цельсія.

Отримані значення негайно передаються в блок перевірки умов безпеки, де аналізується стан кінцевих мікроперемикачів захисних дверей кожуха. Якщо фіксується аварійна ситуація або несанкціоноване відкриття дверей, система миттєво активує захисні інтерлоки та здійснює екстрену зупинку процесу нагнітання, повністю знеструмлюючи приводний контур. За умов штатної роботи та відсутності порушень, обчислювальне ядро передає дані на вхід програмного ПД-регулятора, який на основі величини похибки розраховує необхідний керуючий вплив. На завершальній стадії циклу формуються вихідні сигнали у вигляді широтно-імпульсної модуляції для регулювання швидкості двигуна насоса, оновлюється стан силових реле та світлодіодної індикації, після чого система витримує задану програмну затримку і повторює весь цикл спочатку.

Змонтований у середовищі Tinkercad віртуальний макет являє собою завершений функціональний комплекс із чітко визначеними апаратними зв'язками між елементами, модернізований з метою впровадження розвиненого людино-машинного інтерфейсу (НМІ) та дворівневої системи протиаварійного захисту. Його обчислювальну основу складає мікроконтролерна плата Arduino Uno, яка забезпечує зняття первинних даних, тактування, розподіл напруги живлення та виконання загальної логіки автоматичного керування лабораторним стендом.

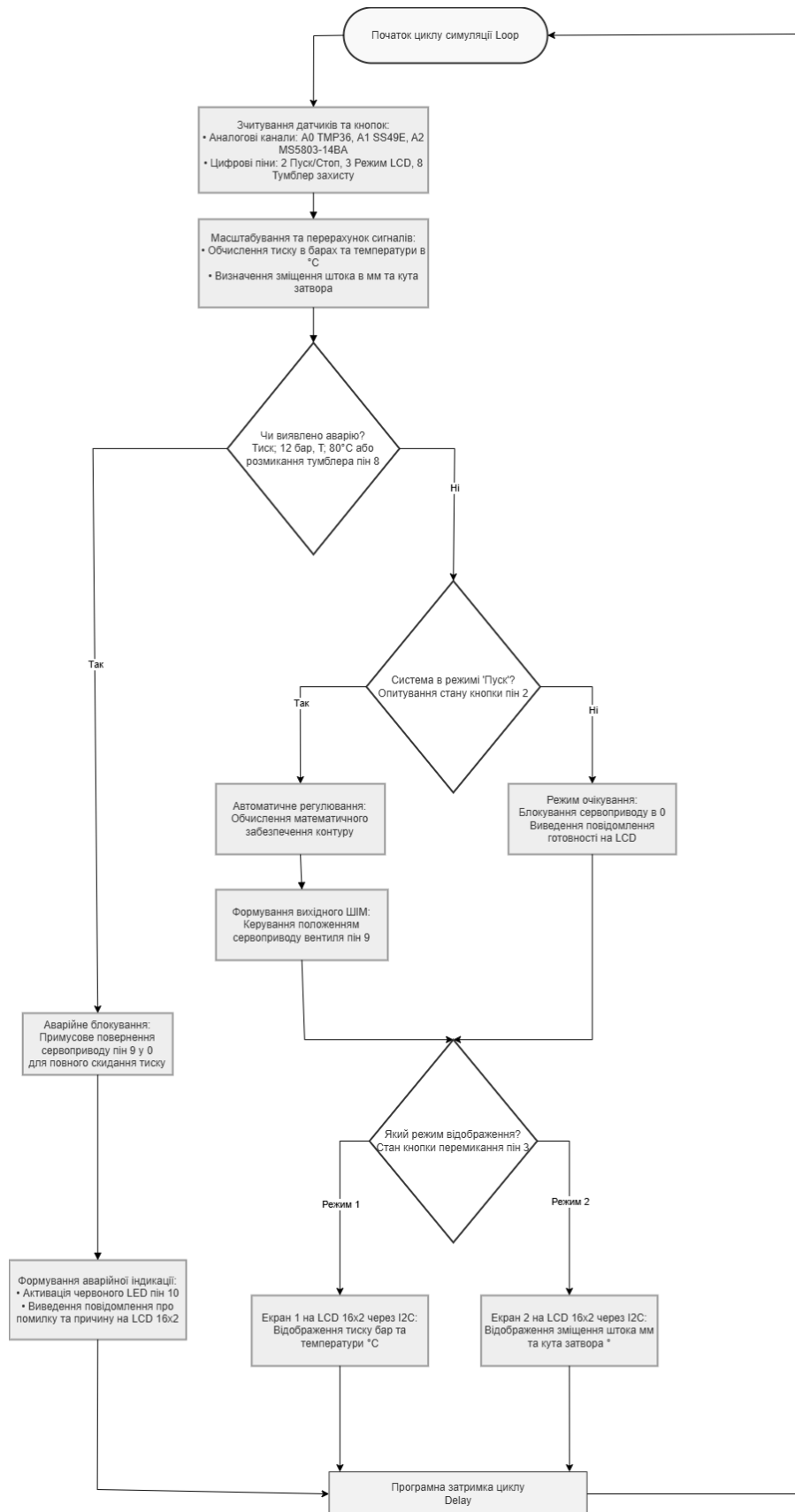


Рисунок 2.19. Блок-схема алгоритму функціонування програмного забезпечення мікроконтролера в режимі реального часу

Вхідний вимірювальний контур побудований із залученням трьох незалежних аналогових каналів. Аналоговий вхід A0 виділено для підключення температурного сенсора TMP36, який контролює термічний стан ущільнювальних елементів камери, тоді як входи A1 та A2 використовуються для зняття сигналів із прецизійних елементів, що моделюють роботу лінійного датчика Холла SS49E (контроль положення штока регульовального вентиля) та високоточного датчика абсолютного тиску MS5803-14BA відповідно.

Для забезпечення оперативного двостороннього зв'язку оператора з технологічною установкою впроваджено блок керування та відображення даних. Він включає дві тактові кнопки, підключені до цифрових пінів 2 та 3 із використанням внутрішньої програмної підтяжки мікроконтролера, які відповідають за запуск або зупинку автоматичного процесу паскалізації та динамічне перемикавання між інформаційними екранами. Візуалізація вимірних параметрів здійснюється за допомогою рідкокристалічного дисплея LCD 16x2, інтегрованого через послідовну шину розширення I2C до портів передачі даних A4 (SDA) та тактування A5 (SCL), що суттєво оптимізує використання цифрових виводів плати. Контур апаратного захисту додатково містить перемикач на цифровому піні 8, який імітує спрацювання кінцевих вимикачів дверей захисного столу-кожуха установки.

Вихідний виконавчий тракт представлений сервоприводом вентиля високого тиску, підключеним до цифрового виходу 9 із апаратною підтримкою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), який забезпечує прецизійне позиціонування затвора залежно від поточного тиску в магістралі. Для екстреної світлової сигналізації про виникнення критичних режимів (перегрів або надлишковий тиск) застосовано червоний аварійний світлодіод, підключений до цифрового піна 10 через струмообмежувальний резистор опором 220 Ом, який автоматично активується одночасно із виведенням пріоритетного повідомлення про помилку на НМІ-дисплей.

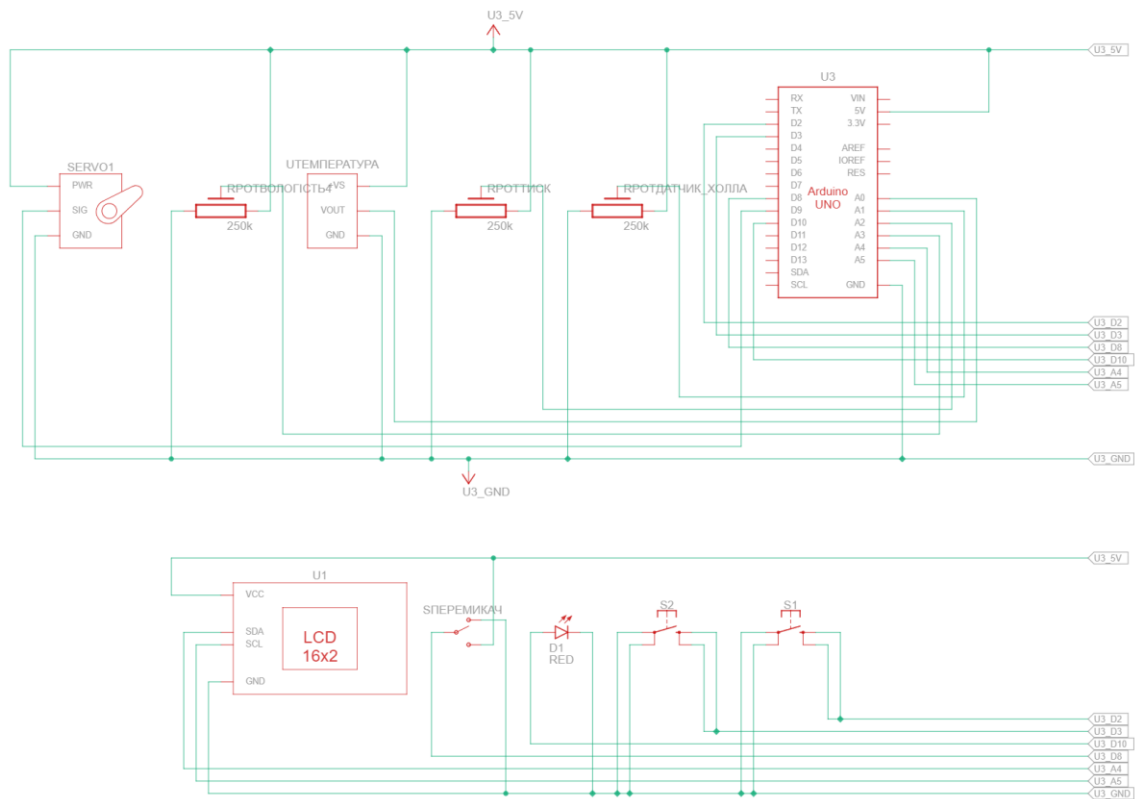


Рисунок 2.20. Схема електрична принципова розробленого інформаційно-керуючого контуру установки

Висновок до другого розділу

У другому розділі було спроектовано загальну архітектуру та розроблено алгоритм функціонування автоматизованої системи керування лабораторним стендом високого гідростатичного тиску. Здійснено детальний аналіз кінематичних і гідродинамічних характеристик базового устаткування, зокрема триплунжерного регульованого гідравлічного насоса та автономних клапанних камер. Досліджено конструктивні особливості комутаційно-вимірювального вузла на базі вентиля високого тиску, який виконує подвійну функцію: прецизійного виконавчого органу для дроселювання потоку та вимірювального колектора (маніфольда) для встановлення первинних перетворювачів.

На основі визначених технічних вимог було здійснено вибір та обґрунтування елементної бази інформаційно-керуючого контуру. У ролі базового обчислювального шлюзу обрано мікроконтролерну платформу

Arduino Uno (ATmega328), яка працює в комплексі з промисловим логічним реле Schneider Electric Zelio Logic. Вимірювальний тракт побудовано на базі високоточного цифрового датчика абсолютного тиску MS5803-14BA, лінійного датчика Холла SS49E для контролю положення штока вентиля та датчика мікроклімату SHT20. На основі цих компонентів було розроблено функціональну схему автоматизації (ФСА), яка визначає канали зв'язку та забезпечує децентралізований збір даних.

Синтезовано алгоритм функціонування розробленої системи, який базується на принципах безперервного циклічного моніторингу параметрів, програмної фільтрації високочастотних завад (алгоритм «ковзного середнього») та багаторівневого захисту. Описано математичне забезпечення пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора, який відповідає за прецизійне підтримання заданої уставки тиску шляхом формування ШІМ-сигналу для виконавчого приводу. Окрему увагу приділено алгоритмам безпеки, що включають програмні обмеження максимального тиску і температури, а також безумовні апаратні інтерлоки на основі кінцевих вимикачів захисного кожуха та кулачкових перемикачів.

Для перевірки працездатності розроблених апаратно-програмних рішень проведено віртуальне моделювання інформаційно-керуючого контуру в хмарному середовищі Autodesk Tinkercad Circuits. Завдяки застосуванню методу електричного еквівалентування (заміщення цифрових датчиків прецизійними потенціометрами) було перевірено логіку роботи мікроконтролера в режимі реального часу. Результати моделювання підтвердили адекватність реакції системи на зміну вхідних параметрів, стабільність роботи ПІД-алгоритму та гарантоване спрацювання підсистеми протиаварійного захисту, що повною мірою доводить готовність розробленої архітектури до практичної інтеграції у фізичний лабораторний стенд.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗРОБЛЕНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Мета, умови та методика проведення віртуального експерименту

Зважаючи на екстремальні умови експлуатації лабораторного стенду високого гідростатичного тиску , зокрема робочі навантаження, що можуть сягати та перевищувати 600 МПа , а також враховуючи суттєву нелінійність динамічних властивостей робочого середовища під час стиснення , безпосереднє впровадження неперевіраних алгоритмів керування на фізичному об'єкті становить значну небезпеку. Будь-яка системна помилка у програмному коді мікроконтролера на етапі нагнітання або декомпресії може призвести до гідроударів, вибухоподібної розгерметизації контуру та катастрофічних наслідків для персоналу й дороговартісного обладнання. Тому першим та обов'язковим етапом експериментального дослідження розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи керування є проведення серії безпечних віртуальних випробувань.

Головною метою даного етапу досліджень є комплексна верифікація апаратно-програмних рішень, аналіз динамічних характеристик контуру стабілізації тиску та перевірка абсолютної надійності спрацювання підсистеми протиаварійного блокування (інтерлоків) в умовах, максимально наближених до реальних. Методика проведення експерименту повністю базується на використанні хмарного середовища автоматизованого проєктування Autodesk Tinkercad Circuits, яке забезпечує інтерактивну симуляцію схемотехнічних рішень у режимі реального часу. Відповідно до інженерних припущень, обґрунтованих у попередньому розділі, тестування проводиться на еквівалентній схемі, де високоспеціалізовані цифрові датчики тиску MS5803-14BA , датчики температури та вологості SHT20 і датчики Холла SS49E

функціонально замінені прецизійними потенціометрами. Такий метод електричного заміщення дозволяє досліднику в ручному режимі гнучко імітувати різноманітні сигнали та створювати тестові збурення без застосування фізичних протоколів обміну даними, таких як I2C.

Під час експериментальних досліджень на аналогові входи мікроконтролерної платформи Arduino Uno безперервно подавалися тестові впливи. Шляхом обертання ручок потенціометрів імітувалися ключові технологічні ситуації: плавне зростання тиску під час штатної роботи насоса, раптовий стрибок тиску вище гранично допустимого рівня, а також критична зміна температури макросередовища. Окремому тестуванню підлягав контур апаратного захисту, для чого здійснювалося перемикання віртуальних тумблерів, які моделювали несанкціоноване відкриття дверцят захисного столу-кожуха установки.

Основними критеріями оцінки ефективності розробленої системи слугували реакції обчислювального ядра на внесені збурення. У процесі симуляції фіксувалася здатність програмного ПІД-регулятора адекватно розраховувати величину похибки та формувати коректний вихідний керуючий ШІМ-сигнал для регулювання швидкості віртуального електродвигуна. Також оцінювалася швидкодія алгоритмів безпеки: час екстреного знеструмлення приводного контуру та активації червоної світлодіодної індикації при імітації аварійних умов. Проведення таких експериментів дозволяє зібрати необхідні дані для підтвердження того, що запропоновані математичні моделі та програмний код цілком готові до подальшої інтеграції у реальний фізичний контролер лабораторного стенду.

3.2. Експериментальне дослідження контуру автоматичної стабілізації тиску

Експериментальне дослідження контуру автоматичної стабілізації тиску виконувалося у середовищі Autodesk Tinkercad на віртуальному макеті, що відтворює роботу автоматизованої системи керування лабораторним стендом

високого гідростатичного тиску. Для моделювання роботи датчиків, виконавчих механізмів і органів керування було використано мікроконтролер Arduino Uno, рідкокристалічний дисплей з інтерфейсом I2C, сервопривід регульовального вентиля, а також кнопки запуску системи, перемикання режимів індикації та аварійного вимкнення. У розробленій програмі передбачено безперервне зчитування сигналів з аналогових входів, оброблення вимірних значень та формування керуючого впливу на сервопривід залежно від поточного рівня тиску, температури та стану системи.

На початковому етапі після подачі живлення мікроконтролер виконує ініціалізацію всіх підключених модулів, після чого на дисплеї з'являється повідомлення про готовність системи до роботи. У цьому стані автоматичне керування ще не активується, а виконавчий механізм займає безпечне початкове положення. Такий режим дає змогу оператору перевірити правильність запуску та готовність апаратної частини до подальшого експерименту. На рис. 3.1 показано початковий стан системи, на якому видно повідомлення про готовність до запуску та очікування команди оператора.

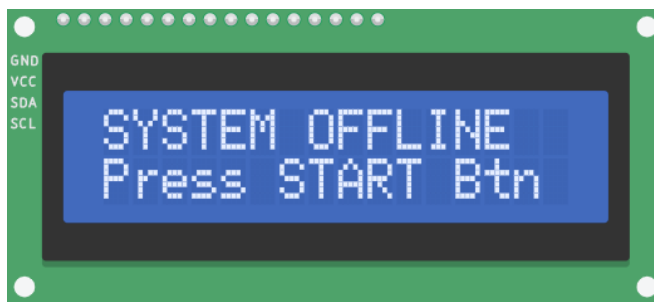


Рис. 3.1. Повідомлення про готовність до запуску та очікування команди оператора

Після натискання кнопки запуску система переходить у активний режим автоматичного регулювання. У цьому стані мікроконтролер починає циклічно опитувати датчики та обчислювати поточні значення контрольованих параметрів. На першому екрані дисплея відображаються тиск і температура, а також службовий статус, що підтверджує перехід до режиму автоматичної

роботи. Саме цей режим є основним під час експерименту, оскільки в ньому система реагує на зміну умов та підтримує задані параметри без постійного втручання оператора. На рис. 3.2 показано екран з поточними показами тиску, температури та позначенням автоматичного режиму.



Рис. 3.2. Екран з поточними показами тиску, температури та позначенням автоматичного режиму

Під час експерименту змінювали вхідні сигнали, що імітували зміну технологічних параметрів у реальній установці. У віртуальному середовищі це виконувалося шляхом зміни положення потенціометрів, які замінювали датчики тиску, температури та положення штока. При збільшенні або зменшенні значення тиску програма формує відповідну зміну кута відкриття сервопривода, завдяки чому змінюється гідравлічний опір контуру. Це дає можливість оцінити, як система реагує на коливання параметрів і наскільки швидко вона повертається до стабільного стану. На рис. 3.3 – 3.5 наведено кілька скріншотів із різними значеннями тиску, на яких видно зміну положення виконавчого механізму та відповідне оновлення числових показів на дисплеї.

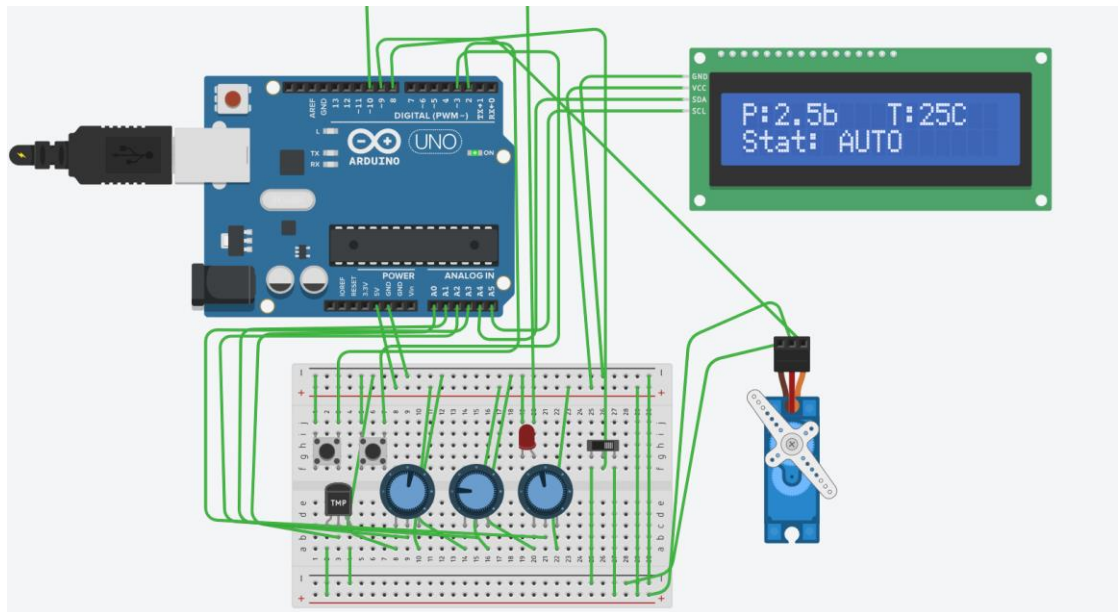


Рис. 3.3. Система при низькому тиску

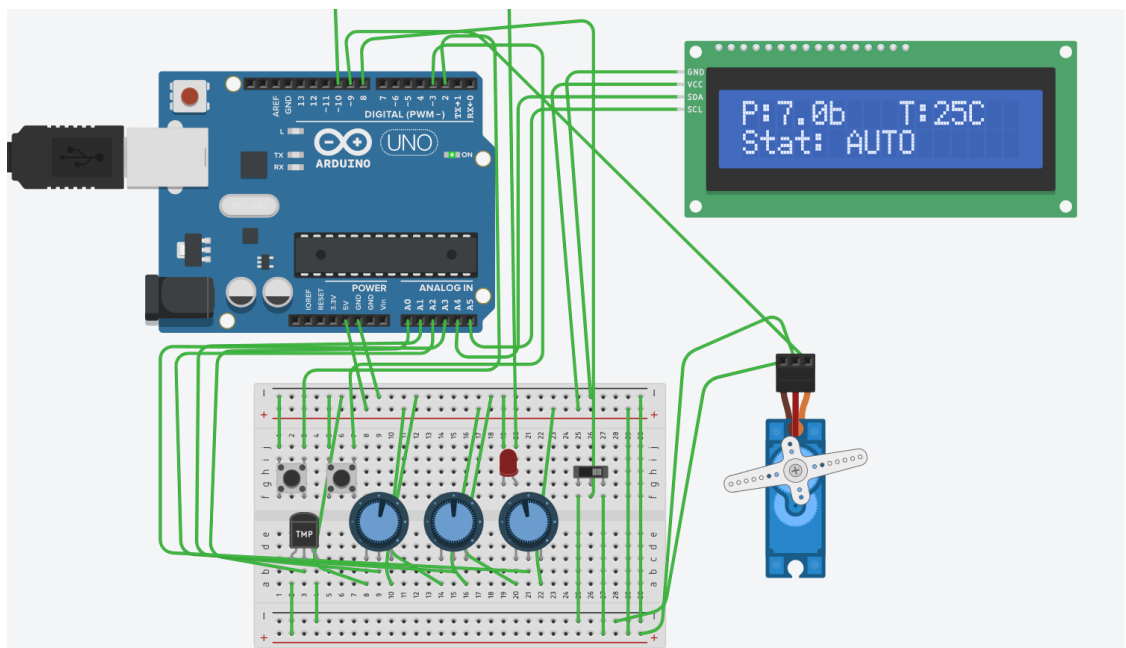


Рис. 3.4. Система при середньому тиску

Паралельно з виведенням інформації на дисплей усі поточні параметри передаються до послідовного порту, де відображаються у вигляді зручного текстового повідомлення. Це дає змогу здійснювати додатковий контроль за роботою системи під час моделювання та перевіряти коректність обчислень у режимі реального часу. Використання серійного монітора є корисним під час налагодження, оскільки дозволяє зіставити відображення на екрані з внутрішніми обчисленнями мікроконтролера. На рис. 3.7 показано вікно серійного монітора з повним набором поточних параметрів роботи системи.

```
e: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
[ AUTO REGULATION ] T: 24.8 C | P: 11.2 bar | Pos: 2.0 mm | Angle: 168 deg
```

Рис. 3.7. Вікно серійного монітора з повним набором поточних параметрів роботи системи.

Отримані результати експерименту підтвердили, що контур автоматичної стабілізації тиску працює коректно, забезпечує безперервний контроль вимірюваних параметрів та зміну положення виконавчого органа залежно від поточного стану системи. У нормальному режимі установка функціонує без втручання оператора, а вся необхідна інформація виводиться у зрозумілому вигляді на дисплей і в серійний монітор. Це свідчить про придатність розробленого алгоритму до подальшого використання в складі лабораторного стенда.

3.3. Експериментальне дослідження підсистеми протиаварійного захисту та блокувань

Окремим етапом дослідження стала перевірка підсистеми протиаварійного захисту та блокувань, оскільки саме вона забезпечує безпечну експлуатацію установки у випадку виникнення небезпечних

режимів. У програмі передбачено контроль перевищення граничного тиску, контроль перегріву, а також спрацювання аварійного вимикача. У разі появи будь-якої з цих ситуацій система негайно переводить виконавчий механізм у безпечне положення, активує світлову сигналізацію та виводить на дисплей попереджувальне повідомлення. Така логіка роботи дозволяє запобігти пошкодженню обладнання і підвищує загальний рівень надійності стенда.

Перший сценарій аварійної перевірки був пов'язаний із перевищенням допустимого тиску. Під час моделювання значення датчика тиску поступово збільшували до критичної межі, після чого програма фіксувала аварійний стан і переводила сервопривід у мінімальне безпечне положення. На екрані дисплея з'являлося повідомлення про критичну помилку та перевищення тиску, а світлодіод аварійної сигналізації переходив у активний стан. Така реакція підтверджує, що система не допускає подальшого зростання тиску після досягнення граничного значення та оперативно переводить контур у безпечний режим. На рис. 3.8 відображено аварійне спрацювання за високого тиску.

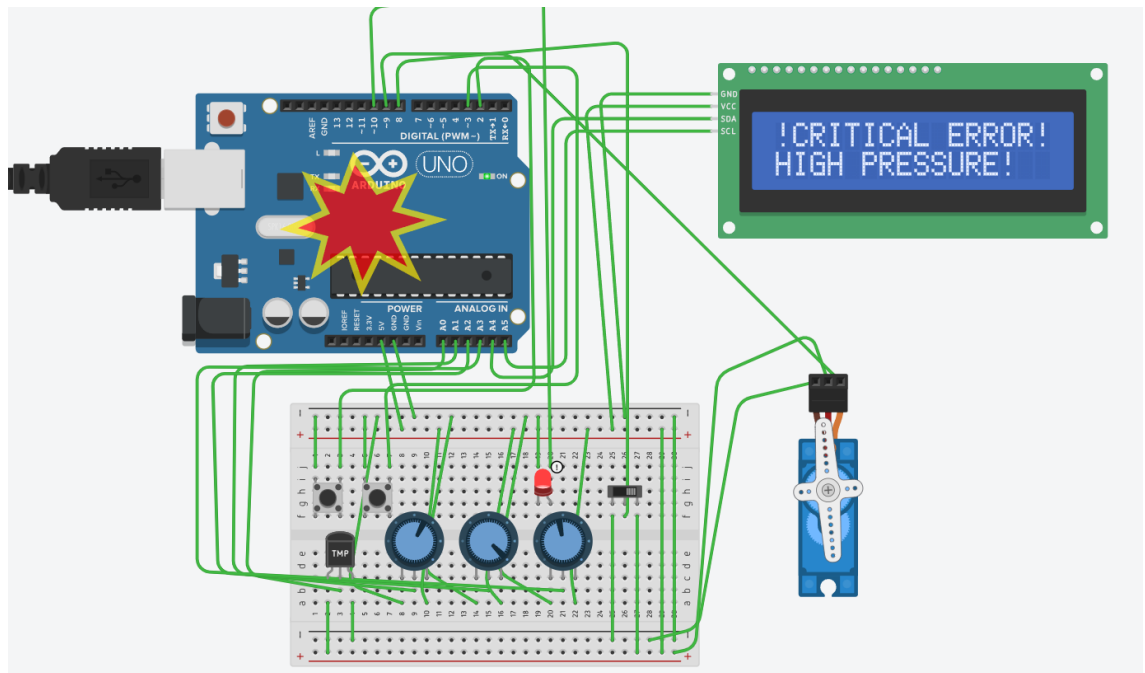


Рис. 3.8. Аварійне спрацювання за високого тиску

Другий сценарій стосувався перевищення температури, що може бути ознакою перегріву ущільнень або порушення нормального режиму роботи установки. При досягненні критичного значення температури програма так само блокує подальшу роботу системи, переводить виконавчий механізм у безпечний стан і виводить на дисплей аварійне повідомлення. У реальній експлуатації така функція є необхідною, оскільки перегрів може спричинити втрату герметичності та прискорений знос елементів конструкції. На рис. 3.9 відображено аварію за температурою.

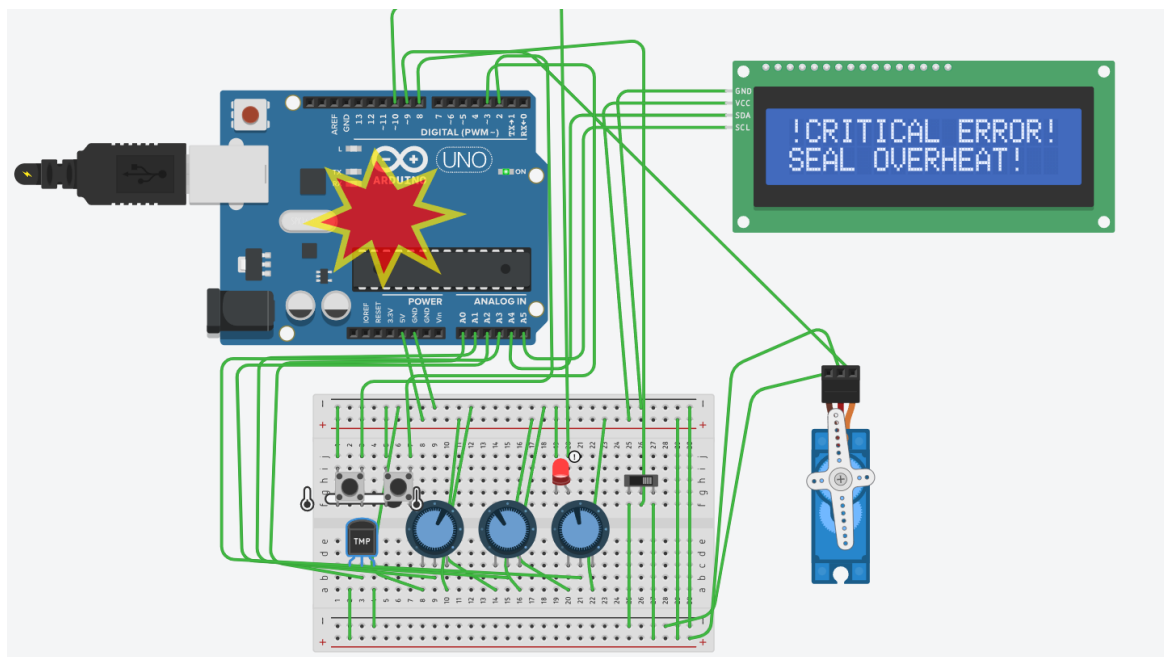


Рис. 3.9. Аварійне спрацювання за температурою

Третій сценарій передбачав перевірку дії аварійного вимикача. У такому випадку оператор може примусово зупинити роботу системи незалежно від поточних показів датчиків і фази технологічного процесу. Після спрацювання аварійної кнопки програма негайно переводить установку у безпечний стан, зупиняє керуючий вплив на сервопривід і виводить повідомлення про аварійну зупинку. Це забезпечує можливість швидкого реагування на непередбачувані ситуації та є важливою складовою безпечної роботи лабораторного стенда. На рис. 3.10 видно реакцію системи на аварійне вимкнення.

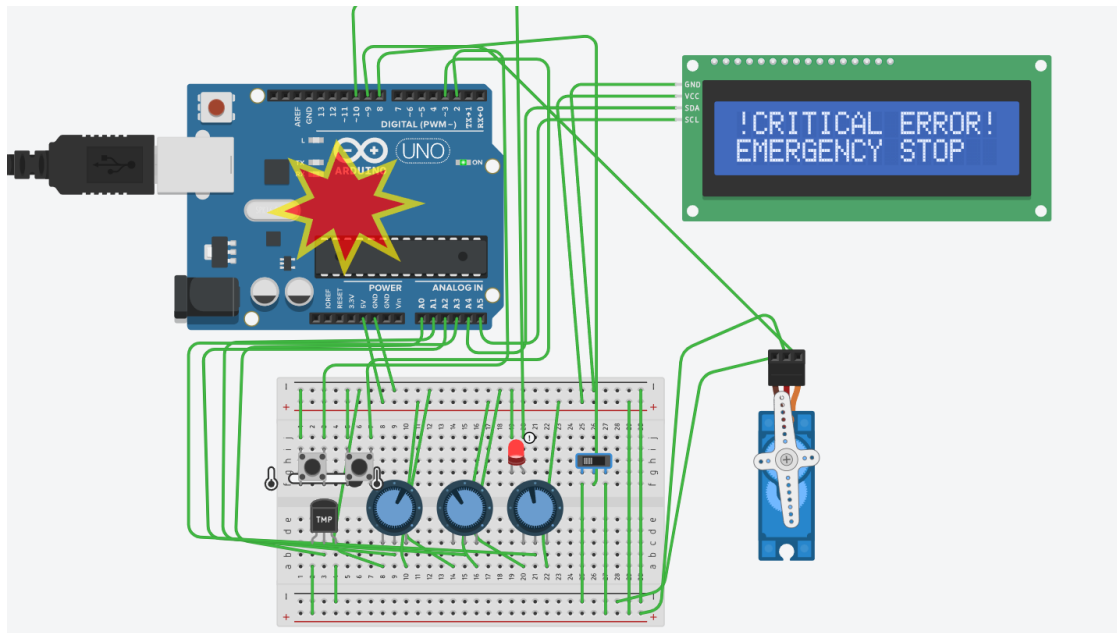


Рис. 3.10. Реакція системи на аварійне вимкнення

Проведені випробування показали, що підсистема протиаварійного захисту працює надійно, своєчасно реагує на перевищення допустимих значень і забезпечує блокування подальшої роботи установки до усунення причини аварії. Після спрацювання захисту система не переходить автоматично назад до активного режиму, що є правильним з точки зору безпеки, оскільки повторний запуск має виконуватися лише оператором після перевірки стану обладнання. Таким чином, розроблена підсистема забезпечує ефективне попередження небезпечних ситуацій і підтверджує придатність програмно-апаратного комплексу до роботи в складі лабораторного стенда високого гідростатичного тиску.

Висновок до третього розділу

У третьому розділі дипломного проєкту було проведено експериментальне дослідження розробленої системи. Основні результати та перевірка ефективності розробленого інформаційно-керуючого контуру базувалися на віртуальному моделюванні, яке було успішно реалізовано у програмному середовищі Tinkercad.

За результатами експериментального дослідження контуру автоматичної стабілізації тиску було повністю підтверджено ефективність застосування прецизійного ПІД-регулювання для високотискових процесів. Апаратна архітектура, побудована на базі мікроконтролера Arduino Uno та сучасного програмованого логічного контролера Zelio Logic, забезпечила необхідну швидкість обробки даних для динамічної адаптації керуючих впливів. Завдяки впровадженню комплексу високоточних цифрових компонентів — зокрема геометричного датчика тиску MS5803-14BA, модуля датчика температури та вологості SHT20, а також модульного датчика Холла SS49E — було організовано безперервний та точний моніторинг критичних параметрів середовища у реальному часі.

Окрему увагу було приділено експериментальному дослідженню підсистеми протиаварійного захисту та блокувань, результати якого довели високу надійність вбудованих апаратних і програмних інтерлоків. Віртуальні випробування підтвердили здатність системи миттєво реагувати на вихід технологічних параметрів за безпечні експлуатаційні межі. Це дозволяє гарантовано усунути критичні ризики та небезпеку ручного керування установкою, а також превентивно блокувати фактори, що можуть призвести до гідроударів.

У підсумку, розроблена комп'ютерно-інтегрована система довела свою працездатність та здатність відпрацьовувати задані алгоритми стабілізації тиску й безпечної декомпресії, що забезпечує надійну експлуатацію лабораторного стенду в автоматизованому режимі.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті вирішено актуальне науково-практичне завдання, яке полягає у розробці та дослідженні мікроконтролерної системи автоматичного керування лабораторним стендом для обробки матеріалів надвисоким гідростатичним тиском. На основі глибокого аналізу термодинамічних процесів, зокрема реологічних змін робочих рідин та фазових станів води при екстремальних навантаженнях, теоретично обґрунтовано та практично доведено необхідність повної відмови від ручного керування. Спроектowana комп'ютерно-інтегрована система дозволила усунути ризики людського фактору, забезпечивши високу точність ведення технологічного процесу паскалізації та гарантовану безпеку експлуатації обладнання при екстремальних гідродинамічних навантаженнях.

Практичним результатом проєктування стала комплексна апаратно-програмна архітектура, ядром якої виступає обчислювальна мікроконтролерна платформа у поєднанні з промисловим логічним реле для забезпечення безвідмовності базових механізмів. Запропоноване технічне рішення для інформаційно-вимірювального тракту, що базується на використанні прецизійного цифрового перетворювача абсолютного тиску, лінійного датчика Холла для моніторингу положення виконавчих органів та модуля контролю мікроклімату, забезпечило децентралізований і високоточний збір даних у режимі реального часу. Розроблена функціональна схема автоматизації ефективно об'єднала гідравлічну помпу, автономні клапанні камери та комутаційно-вимірювальний маніфольд у єдиний керований комплекс.

Синтезоване математичне та алгоритмічне забезпечення довело свою високу ефективність під час етапу віртуального моделювання та верифікації. Реалізований пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання у комбінації з алгоритмами цифрової фільтрації сигналів забезпечив плавний вихід системи на задані уставки без критичного перерегулювання та здатність

миттєво компенсувати зовнішні збурення, такі як мікровитоки робочого середовища. Вагомим досягненням стала розробка та успішне тестування багаторівневої підсистеми протиаварійного захисту. Апаратні та програмні інтерлоки продемонстрували абсолютну надійність при імітації позаштатних ситуацій, здійснюючи миттєве блокування системи та запобігаючи незворотним руйнуванням гідроарматури.

У підсумку, розроблений проєкт цілком відповідає сучасним вимогам до промислової та лабораторної автоматизації. Створена система не лише мінімізує кавітаційний знос обладнання за рахунок плавного керування гідравлічними потоками, але й відкриває нові можливості для проведення високоточних досліджень у галузях харчової промисловості та матеріалознавства. Запропоновані інженерні рішення успішно пройшли етап прототипування і повністю готові до імплементації на фізичному стенді, що підтверджує завершеність та високу практичну цінність виконаного дипломного проєкту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Організація виконання та захисту, вимоги до структури, змісту та оформлення: навчальний посібник [Електронний ресурс] : навчальний посібник призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. : В. С. Антонюк, Н. І. Бурау, Ю. В. Киричук, М. В. Філіппова. – Електронні текстові дані (1 файл: 500.69 КБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 45 с.
2. Виробнича практика. Організація, проходження та захист звіту [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М. О. Безуглий, Н. І. Бурау, Ю. В. Киричук, М. В. Філіппова. – Електронні текстові дані (1 файл: 704 Кбайта). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 40 с
3. "Phase diagram of water and ice." *Statistical Physics Group*, ergodic.ugr.es/termo/lecciones/water1.html. 15.05.26.
4. "Microbial inactivation by high pressure processing: principle, mechanism and factors responsible." *PMC*, pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7847475/. 15.05.26.
5. Турбіцький, О., Терещенко, М., Велигоцький, Д., Мамілов, С., & Комарова, О. (2025). Спектральна залежність фотодисоціації оксигемоглобіну під дією ближнього інфрачервоного лазерного випромінювання. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, (70 (2)), 100-107. [https://doi.org/10.20535/1970.70\(2\).2025.348023](https://doi.org/10.20535/1970.70(2).2025.348023)

6. Velyhotskyi, D. (2025). Design of Multi-Wavelength Photoplethysmography System for Non-Invasive Measurement of Oxyhemoglobin and Carboxyhemoglobin. In *Advanced System Development Technologies II* (pp. 165-198). Cham: Springer Nature Switzerland.
7. Yesman, S. S., Veligotsky, D. V., Mamilov, S. O., Gisbrecht, A. I., Mircheva, V. S., & Zaharieva, L. B. (2019, October). Optical diagnostics of the condition of the cardio vascular system on the basis of optoelectronic methods. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 618, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
8. Morris, B. A. "A perspective on additives for flexible packaging." *ResearchGate*,
www.researchgate.net/publication/382010036_A_perspective_on_additives_for_flexible_packaging. Дата звернення 25.05.2026.
9. Kosogor, A., Soprunyuk, V., Koraltan, S., Golub, V., Velyhotskyi, D., Chernenko, V., ... & L'vov, V. A. (2024). Strong influence of magnetic field and non-uniform stress on elastic modulus and transition temperatures of twinned Ni–Fe (Co)–Ga alloy. *Scientific Reports*, 14(1), 12199.
10. Stelmakh, O. P., Stetsenko, I. V., & Velyhotskyi, D. V. (2020). Information technology of video data processing for traffic intensity monitoring.
11. "Adding SCADA to a Hydraulic Power Unit." *Tech Briefs*,
www.techbriefs.com/component/content/article/26434-adding-scada-to-a-hydraulic-power-unit. Дата звернення 19.05.26.
12. Системи автоматизованого проєктування: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерноінтегровані системи та технології в приладобудуванні» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; автори: К.С. Барандич, О.О. Подолян, М.М. Гладський. – Електронні текстові дані (1 файл 3,05 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 97 с.

13. Велигоцький, Д., Дуга, С., & Мамілов, С. (2025). Система багатохвильової фотоплетизмографії. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, 69(1), 106-118. [https://doi.org/10.20535/1970.69\(1\).2025.331971](https://doi.org/10.20535/1970.69(1).2025.331971)
14. Alicke, Falk. "Low-Power Signal Conditioning for a Pressure Sensor." *Texas Instruments*, Application Report SLAA034A, 05.2015.
15. Hao, Xiaoxi, та ін. "Deep reinforcement learning enhanced PID control for hydraulic servo systems in injection molding machines." *Scientific Reports*, vol. 15, art. 23005, 02.07.2025.
16. EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ Panel), et al. "The Efficacy and Safety of High-Pressure Processing of Food." *EFSA J.*, vol. 20, no. 3, 8 Mar. 2022, e07128, <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7128>.
17. Черепов, Сергій Володимирович. *Магнітні перетворення в неоднорідних твердих розчинах системи Cu-Mn-Al*. 1986. Інститут металофізики АН УРСР, кандидатська дисертація.
18. Panfilov, Anatoliy. "Use of a Pendulum Magnetometer for Measuring the Magnetic Susceptibility of Solids under Pressure: The Compound V4S9Br4." *Low Temperature Physics*, vol. 41, no. 12, Dec. 2015, pp. 1029-1033, <https://doi.org/10.1063/1.4938094>.
19. Xiang, Li, et al. "Characterization of the Pressure Coefficient of Manganin and Temperature Evolution of Pressure in Piston-Cylinder Cells." 19 Aug. 2020.
20. Bekh, I., Mamilov, S., Velyhotskyi, D., Porozinski, I., & Yashan, I. (2024, May). Prototype Device for Measuring Carbon Monoxide Levels in Human Exhalation. In *2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 364-368). IEEE.
21. Iliukha, M., Mamilov, S., Velyhotskyi, D., Bekh, I., & Strykun, O. (2021, November). Software and hardware implementation of current monitoring methods on changes in the health status of carbon monoxide poisoned.

- In 2021 *International Conference on e-Health and Bioengineering (ENB)* (pp. 1-4). IEEE.
22. Велигоцький, Д.В., Стельмах, Н.В., Єсьман, С.С., та Мамілов, С.О. (2012). Апаратно-програмний комплекс для неінвазивного діагностування карбоксигемоглобіну в потоках крові. *Вісник КрНУ ім. М. Остроградського «Інформаційні системи і технології»*, 72(1), 71-74.
23. "Плата Arduino Uno." *Arduinokit*, arduinokit.com.ua/ua/p2443129646-plata-arduino-uno.html. (дата звернення 28.05.26).
24. "SparkFun Pressure Sensor Breakout - MS5803-14BA." *Arduino.ua*, arduino.ua/prod3851-sparkfun-pressure-sensor-breakout-ms5803-14ba. (дата звернення 28.05.26).
25. "Модуль датчика Холла SS49E." *Arduino.ua*, arduino.ua/prod1203-modyl-datchika-holla-ss49e. (дата звернення 28.05.26).
26. "Модуль датчика температури і вологості SHT20 I2C." *Arduino.ua*, arduino.ua/prod4499-modyl-datchika-temperatyri-i-vlajnosti-sht20-i2c. (дата звернення 28.05.26).

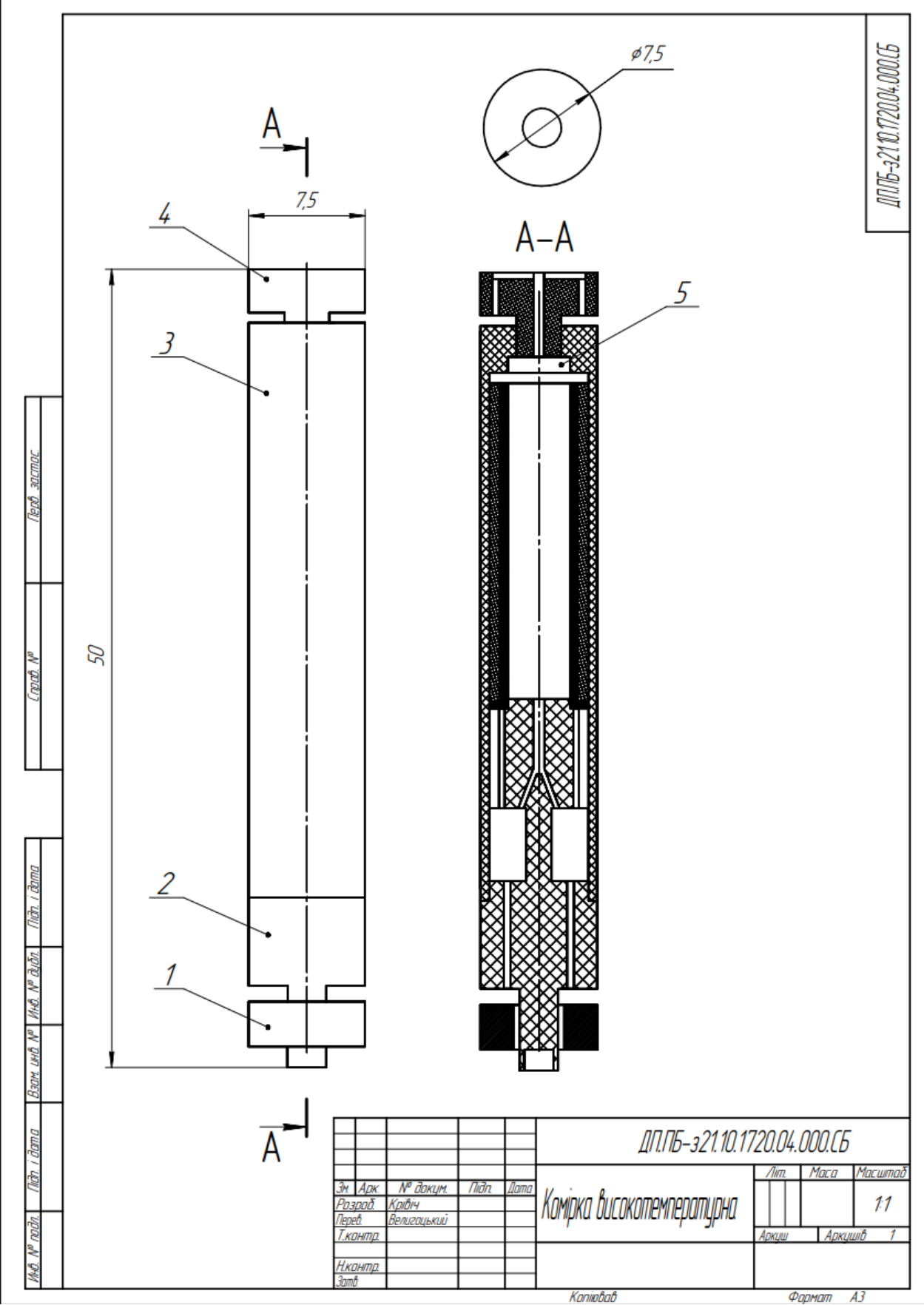
Додаток А

[illegible]

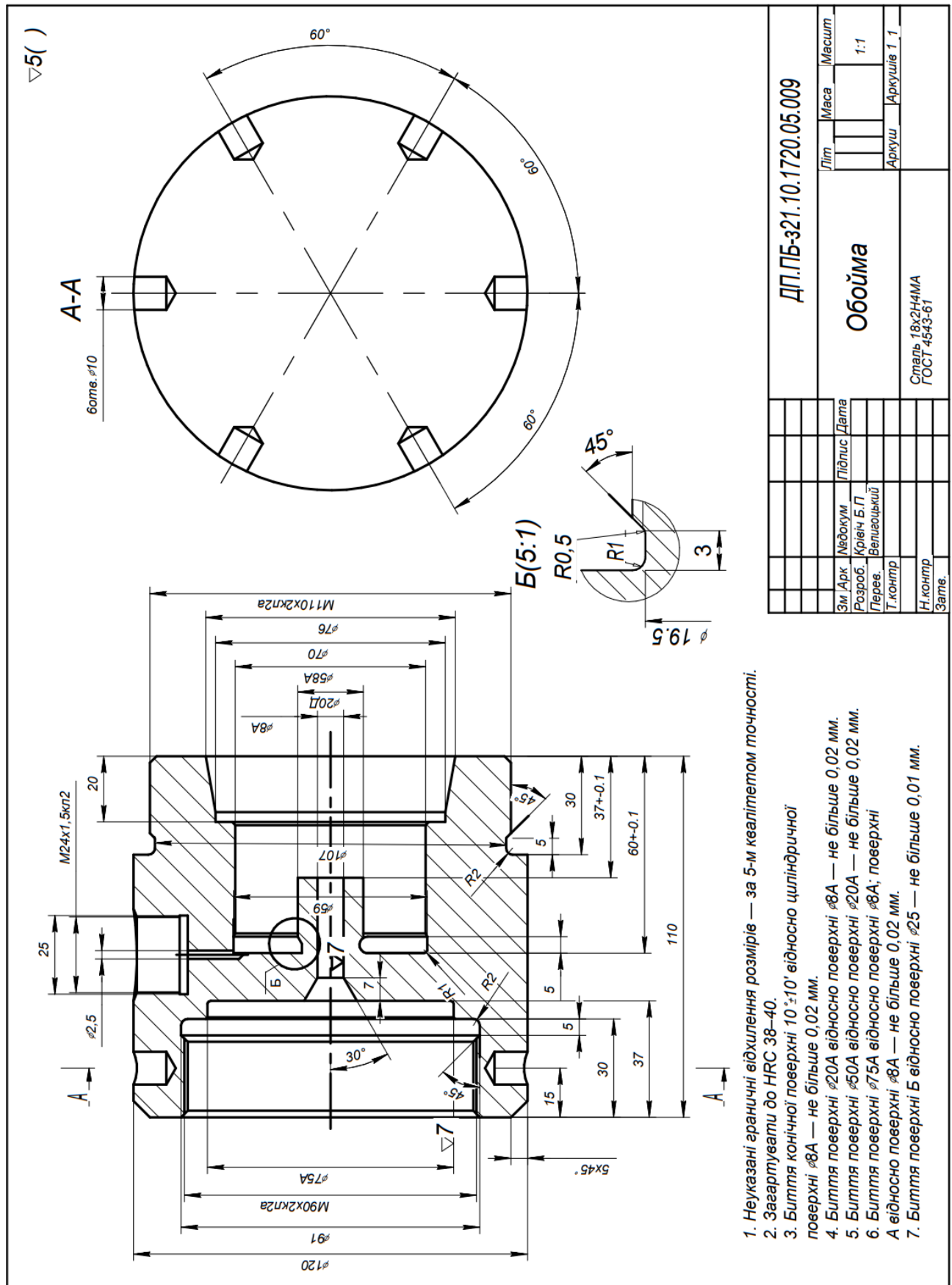
Пер. заст.	Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	К-сть	Примітка
Справ. №					<u>Документація</u>		
	A3			ДП.ПБ-з21.10.1720.04.000.СБ	Складальне креслення		
					<u>Деталі</u>		
		1	ДП.ПБ-з21.10.1720.04.001	Манганіновий манометр	1		
		2	ДП.ПБ-з21.10.1720.04.002	Тримач			
		3	ДП.ПБ-з21.10.1720.04.003	Стакан			
	4	ДП.ПБ-з21.10.1720.04.004	Кришка				
	5	ДП.ПБ-з21.10.1720.04.005	Нагрівач				
Підп. і дата							
Взам. інв. №							
Підп. і дата							
Інв. № подл.							
ДП.ПБ-з21.10.1720.04.000							
Зм	Арк.	№ док-м.	Підп.	Дата			
Розробив	Кривіч				Літ	Аркцш	Аркцшів
Перевірив	Велигоцький						1
Н.контр.					Комірка високотемпературна		
Затв.							

Копіював

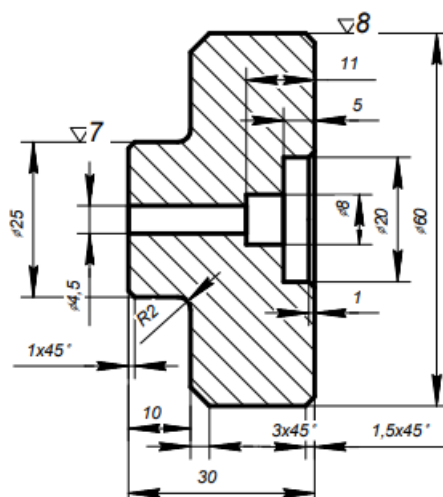
Формат A4



ДП.ПБ-з21.10.1720.04.000.СБ



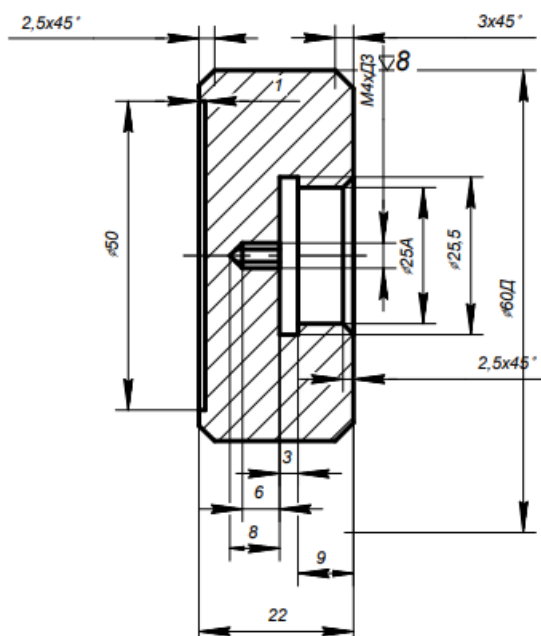
▽6()



1. Розміри без допусків — за 5-м класом точності.
2. Загартувати до HRC 35–38.
3. Неперпендикулярність поверхні А відносно поверхні В — не більше 0,05 мм.
4. Неперпендикулярність поверхні В відносно осі отвору — не більше 0,02 мм.
5. Радіальне биття поверхні Г відносно поверхні А — не більше 0,02 мм.
6. Радіальне биття поверхні А відносно поверхні Д — не більше 0,05 мм.

					ДП.ПБ-з21.10.1720.05.005				
					Поршень				
Зм	Арк	Недокум	Підпис	Дата					
Розроб.	Кривіч Б.П								1:1
Перев.	Велигоцький								
Т.контр					Аркуш		Аркушів 1 1		
					Сталь 45 ГОСТ 1050-60				
Н.контр									
Затв.									

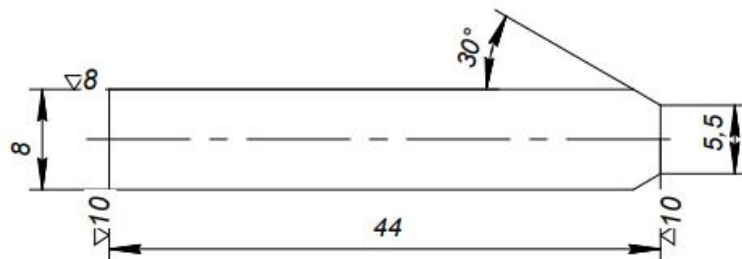
▽6()



1. Розміри без допусків — за 5-м класом точності.
2. Загартувати до HRC 35–38.
3. Радіальне биття поверхні А відносно поверхні Б, а також поверхні А відносно поверхні В — не більше 0,02 мм.
4. Неперпендикулярність поверхні Г відносно поверхні А — не більше 0,05 мм.

					ДП.ПБ-321.10.1720.05.004				
					Поршень				
Зм	Арк	№докум	Підпис	Дата					
Розроб.		Кривіч Б.П.			1:1				
Перев.		Велигоцький							
Т.контр					Аркуш		Аркушів 1 1		
					Сталь 45 ГОСТ 1050-60				
Н.контр									
Затв.									

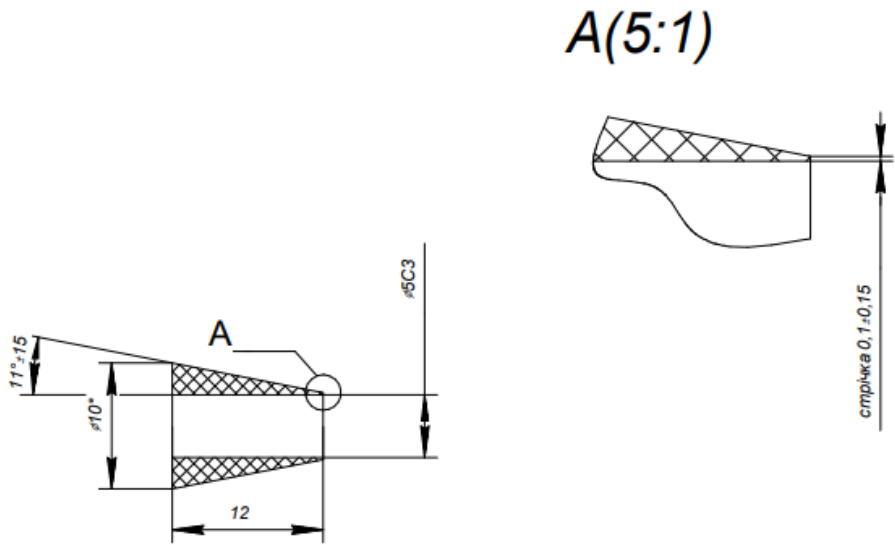
▽6()



1. Загартувати до HRC 55–57.
2. Поверхню А не центрувати.
3. Торцеве биття поверхні А відносно поверхні Б — не більше 0,01 мм.
4. Неперпендикулярність поверхні Б відносно поверхні В — не більше 0,01 мм.

					ДП.ПБ-321.10.1720.05.006				
					Стержень				
Зм	Арк	Недокум	Підпис	Дата					
Розроб.		Кривіч Б.П							
Перев.		Велигоцький							
Т.контр					Лім			Маса	Масшт
									2:1
					Аркуш			Аркушів 1 1	
Н.контр					Сталь ХВГ ГОСТ 5950-63				
Затв.									

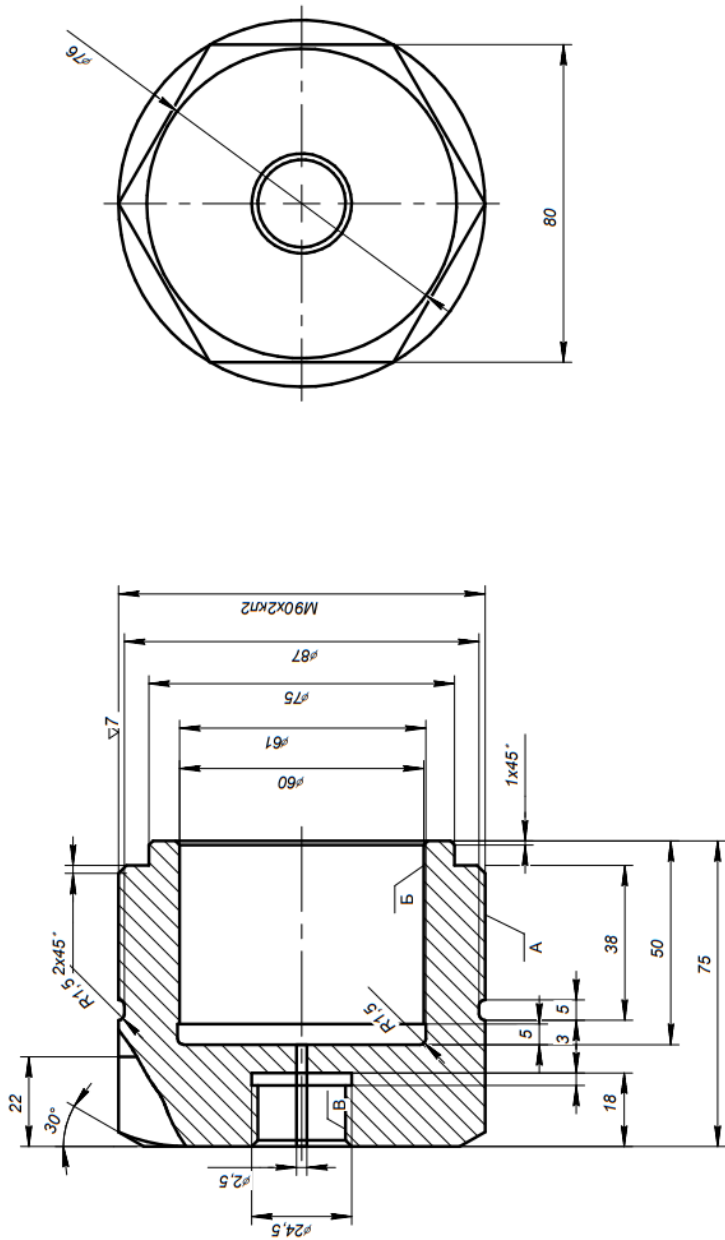
▽6



**Розміри для довідок*

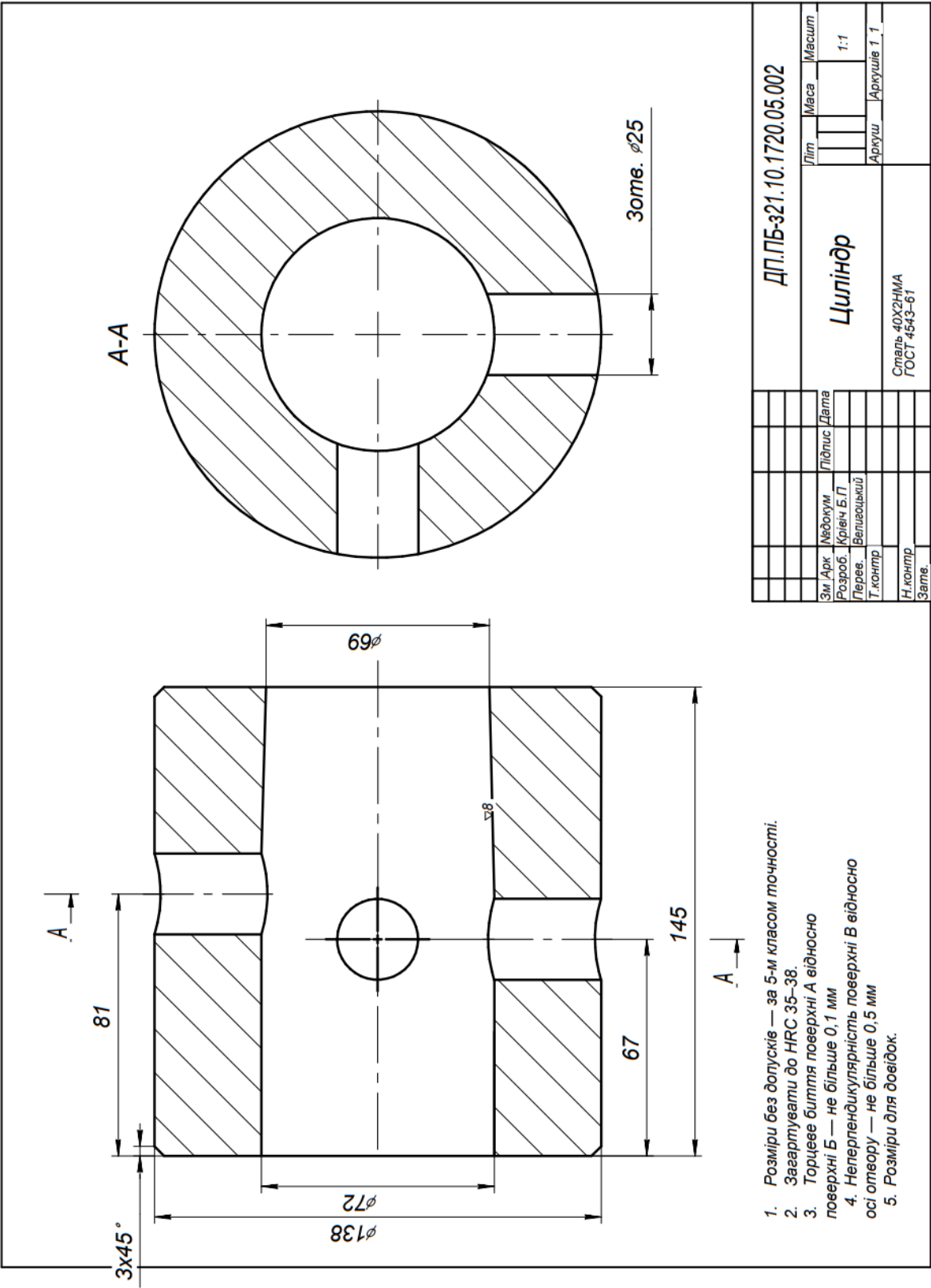
					ДП.ПБ-321.10.1720.05.007							
					Втулка	Лім			Маса		Масшт	
Зм	Арк	Надокум	Підпис	Дата							2:1	
Розроб.		Кривіч Б.П										
Перев.		Велигоцький										
Т.контр												
						Аркуш			Аркушів 1 1			
Н.контр					Фтороплат							
Затв.					ГОСТ							

▽5()



							ДП.ПБ-321.10.1720.05.003			
							Циліндр			
							Літ	Маса	Масшт	
Зм Арк	Медокум	Підпис	Дата							
Розроб.	Крієн Б.П								1:1	
	Перев.									
	Велигоцький									
Т. контр							Аркуш	Аркуше 1	1	
Н. контр							Сталь 40Х2НМА			
Затв.							ГОСТ 4543-61			

1. Розміри без допусків — за 5-м класом точності.
2. Загартувати до HRC 35—38.
3. Радіальне биття поверхні А відносно поверхні Б — не більше 0,02 мм.
4. Радіальне биття поверхні Г відносно поверхні Б — не більше 0,02 мм.
5. Торцеве биття поверхні В відносно осі отвору — не більше 0,01 мм.



Додаток Б

Інв. № подл.		Лист і дата		Вам. инв. №		Инв. № дубл.		Лист і дата		Лист №		Лист застос.																																						
ДП.ПБ-321.10.1720.06.001 СхА																																																		
ТТ/МТ 1-1 ЗІ 2-1 МТ 1 PI 3-1 1 PI 3-1 ЗІ 2-1 ТТ/МТ 1-1 УС 1-2 HS 4-1 Прилади місцеві Прилади на щиті керування <table><tr><td>Зм. Ак.</td><td>№ док.</td><td>Підп.</td><td>Дата</td></tr><tr><td>Розроблює</td><td>Кордч. Б.П.</td><td></td><td></td></tr><tr><td>Перевіряє</td><td>Величак</td><td></td><td></td></tr><tr><td>І. Кант</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Н. Кант</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Затверд.</td><td></td><td></td><td></td></tr></table> <table><tr><td>ДП.ПБ-321.10.1720.06.001 СхА</td><td>Схема автоматизації ...</td><td>Лист</td><td>Маса</td><td>Масштаб</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1:1</td></tr><tr><td></td><td></td><td>Арх.</td><td>Арх.</td><td>1</td></tr></table>												Зм. Ак.	№ док.	Підп.	Дата	Розроблює	Кордч. Б.П.			Перевіряє	Величак			І. Кант				Н. Кант				Затверд.				ДП.ПБ-321.10.1720.06.001 СхА	Схема автоматизації ...	Лист	Маса	Масштаб					1:1			Арх.	Арх.	1
Зм. Ак.	№ док.	Підп.	Дата																																															
Розроблює	Кордч. Б.П.																																																	
Перевіряє	Величак																																																	
І. Кант																																																		
Н. Кант																																																		
Затверд.																																																		
ДП.ПБ-321.10.1720.06.001 СхА	Схема автоматизації ...	Лист	Маса	Масштаб																																														
				1:1																																														
		Арх.	Арх.	1																																														
ДП.ПБ-321.10.1720.06.001 СхА																																																		
Схема автоматизації																																																		
Копія																																																		
Формат А3																																																		

Таблиця 2.1. Специфікація устаткування

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Код	Завод-виробник	Кількість	Маса одиниці, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
УСТАТКУВАННЯ ТА ПРИЛАДИ										
ТТ/МТ 1-1	Температура та вологість	Вхідний трубопровід, робоче середовище	-40...+125 °С	По місцю	Цифровий інтегральний датчик температури та відносної вологості, інтерфейс I2C	SHT20	–	Sensirion	1	0,01
ZT 2-1	Положення штока	Шток регулюючого вентиля	± 10 мм (хід штока)	По місцю	Лінійний датчик положення на ефекті Холла, висока чутливість, аналоговий вихід	SS49E	–	Honeywell	1	0,02
РТ 3-1	Тиск	Вихідний трубопровід, робоче середовище	0...15 бар	По місцю	Високоточний цифровий датчик абсолютного тиску, захищений гелем, інтерфейс I2C	MS5803-14BA	–	TE Connectivity	1	0,01
UC 1-2	Керування (обробка даних)	Сигнали від приладів ТТ/МТ 1-1, ZT 2-1, РТ 3-1	Живлення 24 В DC	Щит керування	Промисловий контролер у комплекті з мікроконтролерним модулем узгодження інтерфейсів. Кількість входів ПЛК: 8 / виходів: 4.	Zelio Logic SR2B121B D / Arduino Uno V3.0 (ATmega328)	–	Schneider Electric	1	0,3
HS 4-1	Блокування живлення	Коло живлення системи	0-1 (вимк/увімк)	Дверцята щита	Кулачковий двопозиційний апаратний перемикач режимів (ручний/автомат)	TO-1-8200/E	–	Eaton (Moeller)	1	0,1
M1	Регулювання положення (рух)	Шток регулюючого вентиля	230 В AC, 50 Гц	По місцю	Електропривод виконавчого механізму зі зворотним зв'язком та кінцевими вимикачами	JA Comfort	–	Elero	1	1,8

Додаток В

Программный код

```
#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

const int PIN_TEMPERATURE_SENSOR = A0;
const int PIN_STEM_POSITION_SENSOR = A1;
const int PIN_PRESSURE_SENSOR = A2;
const int PIN_VALVE_ACTUATOR = 9;
const int PIN_EMERGENCY_SWITCH = 8;

const int PIN_BTN_START_STOP = 2;
const int PIN_BTN_MODE = 3;
const int PIN_ALARM_LED = 10;
const float ARDUINO_VCC_VOLTAGE = 5.0;
const float ADC_MAX_RESOLUTION = 1023.0;
const float TMP36_VOLTAGE_OFFSET = 0.5;
const float TMP36_SCALE_COEFFICIENT = 100.0;
const float STEM_MIN_POSITION_MM = -10.0;
const float STEM_MAX_POSITION_MM = 10.0;
const float SENSOR_MAX_PRESSURE_BAR = 14.0;
const float CRITICAL_MAX_PRESSURE = 12.0;
const float CRITICAL_MAX_TEMPERATURE = 80.0;
const int SERVO_MIN_ANGLE = 0;
const int SERVO_MAX_ANGLE = 180;
const int ADC_REGULATION_LIMIT = 876;

Servo valveServo;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

bool isSystemActive = false;
int displayScreen = 0;
bool isAlarm = false;

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    pinMode(PIN_TEMPERATURE_SENSOR, INPUT);
    pinMode(PIN_STEM_POSITION_SENSOR, INPUT);
    pinMode(PIN_PRESSURE_SENSOR, INPUT);
    pinMode(PIN_EMERGENCY_SWITCH, INPUT);

    pinMode(PIN_BTN_START_STOP, INPUT_PULLUP);
    pinMode(PIN_BTN_MODE, INPUT_PULLUP);
    pinMode(PIN_ALARM_LED, OUTPUT);

    valveServo.attach(PIN_VALVE_ACTUATOR);
```

```

valveServo.write(SERVO_MIN_ANGLE);

lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("System Ready...");
delay(1500);
lcd.clear();

Serial.println("HMS Control System Initialized");
}

void loop() {
  if (digitalRead(PIN_BTN_START_STOP) == LOW) {
    isSystemActive = !isSystemActive;
    lcd.clear();
    delay(300);
  }

  if (digitalRead(PIN_BTN_MODE) == LOW) {
    displayScreen = (displayScreen + 1) % 2;
    lcd.clear();
    delay(300);
  }

  int emergencySwitchState = digitalRead(PIN_EMERGENCY_SWITCH);

  int rawTemperature = analogRead(PIN_TEMPERATURE_SENSOR);
  float inputVoltage = rawTemperature * (ARDUINO_VCC_VOLTAGE / ADC_MAX_RESOLUTION);
  float    currentTemperatureC    =    (inputVoltage    -    TMP36_VOLTAGE_OFFSET)    *
TMP36_SCALE_COEFFICIENT;

  int rawPosition = analogRead(PIN_STEM_POSITION_SENSOR);
  float    currentStemPositionMM    =    map(rawPosition,    0,    ADC_MAX_RESOLUTION,
STEM_MIN_POSITION_MM, STEM_MAX_POSITION_MM);

  int rawPressure = analogRead(PIN_PRESSURE_SENSOR);
  float    currentPressureBar    =    (rawPressure    /    ADC_MAX_RESOLUTION)    *
SENSOR_MAX_PRESSURE_BAR;

  int targetServoAngle = SERVO_MIN_ANGLE;
  String currentSystemStatus = "";
  isAlarm = false;

  if (!isSystemActive) {
    targetServoAngle = SERVO_MIN_ANGLE;
    currentSystemStatus = "SYSTEM STOPPED";
  }
  else if (emergencySwitchState == LOW) {

```

```

    targetServoAngle = SERVO_MIN_ANGLE;
    currentSystemStatus = "EMERGENCY STOP";
    isAlarm = true;
}
else if (currentPressureBar >= CRITICAL_MAX_PRESSURE) {
    targetServoAngle = SERVO_MIN_ANGLE;
    currentSystemStatus = "HIGH PRESSURE!";
    isAlarm = true;
}
else if (currentTemperatureC >= CRITICAL_MAX_TEMPERATURE) {
    targetServoAngle = SERVO_MIN_ANGLE;
    currentSystemStatus = "SEAL OVERHEAT!";
    isAlarm = true;
}
else {
    targetServoAngle = map(rawPressure, 0, ADC_REGULATION_LIMIT, SERVO_MIN_ANGLE,
SERVO_MAX_ANGLE);
    if (targetServoAngle > SERVO_MAX_ANGLE) targetServoAngle = SERVO_MAX_ANGLE;
    if (targetServoAngle < SERVO_MIN_ANGLE) targetServoAngle = SERVO_MIN_ANGLE;

    currentSystemStatus = "AUTO REGULATION";
}

valveServo.write(targetServoAngle);

if (isAlarm) {
    digitalWrite(PIN_ALARM_LED, HIGH);
} else {
    digitalWrite(PIN_ALARM_LED, LOW);
}

if (isAlarm) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("!CRITICAL ERROR!");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(currentSystemStatus + "    ");
}
else if (!isSystemActive) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("SYSTEM OFFLINE ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Press START Btn ");
}
else {
    if (displayScreen == 0) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("P:"); lcd.print(currentPressureBar, 1); lcd.print("b ");
        lcd.setCursor(9, 0);
        lcd.print("T:"); lcd.print(currentTemperatureC, 0); lcd.print("C ");
    }
}

```

```

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Stat: AUTO   ");
}
else if (displayScreen == 1) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Stem: "); lcd.print(currentStemPositionMM, 1); lcd.print("mm ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Angle: "); lcd.print(targetServoAngle); lcd.print((char)223); lcd.print(" ");
}
}

Serial.print("[ " + currentSystemStatus + " ] ");
Serial.print("T: "); Serial.print(currentTemperatureC, 1); Serial.print(" C | ");
Serial.print("P: "); Serial.print(currentPressureBar, 1); Serial.print(" bar | ");
Serial.print("Pos: "); Serial.print(currentStemPositionMM, 1); Serial.print(" mm | ");
Serial.print("Angle: "); Serial.print(targetServoAngle); Serial.println(" deg");

delay(100);
}

```