

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ

Група АКП-23-2К

Микола Сімків

2025

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

Сімків Микола Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація процесу очищення пірогазу від твердих домішок

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

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

Рецензент

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

Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-2К М.І. Сімків
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

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

Допущено до захисту Завідувач кафедри

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ.

А.І. Лагойда.

« » 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Сімків Микола Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу очищення пірогазу від твердих
домішок

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики,
методичні вказівки, технічна література, інтернет-ресурси.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу очищення пірогазу від твердих домішок, 2. Математичне моделювання та ідентифікацію об'єкта , 3. Синтез і дослідження автоматичної системи керування, 4. Розробка основних проектних рішень із автоматизації, Загальні висновки, Перелік посилань на джерела.

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

Лист 1 – Технологічна схема автоматизації – БР.АКП-61.00.00.001;

Лист 2 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКП-61.00.00.002;

Лист 3 – Перелік позначень і приладів– БР.АКП-61.00.00.003;

Лист 4 – Схема підключень – БР.АКП-61.00.00.004;

Лист 5 – Схема зовнішніх з'єднань – БР.АКП-61.00.00.005;

Лист 6 – Загальний вигляд щита – БР.АКП-61.00.00.006;

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 60 сторінок друкованого тексту, 27 рисунків, 1 таблиць, 7 переліків посилань на джерела і 6 графічних додатків.

Тема: « Автоматизація процесу очищення пірогазу від твердих домішок ».

Об'єкт дослідження: Процес очищення пірогазу від твердих домішок.

Мета роботи: Розробити локальну систему керування гартувальної колони для забезпечення очищення пірогазу від твердих домішок.

Методи дослідження: Математичне моделювання, синтез АСК, перевірка стійкості системи за допомогою годографа Михайлова.

Результати бакалаврської роботи: Результатом дипломного проектування створено локальну АСК, проведено математичне моделювання, перевірено стійкість системи, був здійснений підбір ТЗА і створено програмне забезпечення.

Ключові слова: Очищення пірогазу від твердих домішок, гартувальна колона, локальна система керування.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 60 pages of printed text, 27 figures, 1 tables, 7 lists of references to sources and 6 appendices.

Topic: "Automation of pyrogas purification from solid impurities".

Object of research: The process of purifying pyrogas from solid impurities.

Work goal: To create a local control system of a quenching column to ensure pyrogas purification from solid impurities.

Research methods: Mathematical modeling, synthesis of an ASC, verification of system stability using Mikhailov's hodograph.

Results of bachelor's thesis: As a result of diploma design, a local ASC was created, mathematical modeling was carried out, the stability of the system was checked, the selection of TZA was carried out and software was created.

Keywords: Pyrogas purification from solid impurities, quenching column, local control system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОЧИЩЕННЯ ПІРОГАЗУ ВІД ТВЕРДИХ ДОМІШОК.....	11
1.1 Призначення установки та суть процесу.....	11
1.2 Характеристика сировини, реагентів і отриманої продукції.....	12
1.3 Опис технологічного процесу очищення пірогазу від твердих домішок.....	12
1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання.....	14
1.5 Розробка технологічної схеми автоматизації і її опис.....	15
1.6 Вибір і обґрунтування параметрів контролю і управління.....	17
1.7 Постановка задачі на курсове проектування.....	18
Висновки до розділу.....	19
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	20
2.1 Визначення характеристик об'єкта автоматизації.....	20
Висновки до розділу.....	24
3. АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	25
3.1. Визначення якісних показників перехідного процесу.....	25
3.2 Синтез ефективної системи автоматичного керування процесом очищення пірогазу від твердих домішок.....	29
3.3 Визначення параметрів налаштування регуляторів.....	33
3.4 Дослідження системи на стійкість.....	34
Висновки до розділу.....	36

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу очищення пірогазу від твердих домішок	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Сімків М.І.					6	60
Перевір.		Фешанич Л.І.						
Реценз.		Борин В.С.						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В						
Затверд.		Лагойда А.І.				АКП-23-2К ІФНТУНГ		

4. РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ПО АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	37
4.1 Розробка і опис функціональної схеми автоматизації.....	37
4.2 Вибір технічних засобів автоматизації	39
4.3 Розробка додаткових проектних рішень.....	48
4.4 Розробка програмного забезпечення для PLC.....	53
Висновки до розділу.....	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	60
ДОДАТКИ	

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

VC – вініл хлористий

QC – колона гартувальна

CS – програмне забезпечення контроллера

dt_val – інтервал дескритизації

Setpoint_Flow – керуючий вплив на витрату

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Хімічна промисловість є однією з базових галузей економіки України, що формує сировинну основу для розвитку енергетики, машинобудування, будівництва, легкої, харчової, аграрної промисловості, медицини та інших секторів. У структурі хімічного виробництва особливе місце займає нафтохімія — високотехнологічна галузь, що орієнтована на переробку продуктів нафтопереробки з метою отримання полімерів, пластмас, синтетичних волокон і смол. Одним із найважливіших продуктів нафтохімічного виробництва є хлористий вініл, з якого виготовляється полівінілхлорид (ПВХ) — один із найбільш універсальних і широко вживаних термопластичних полімерів.

Світовий попит на ПВХ зростає внаслідок розширення сфер його застосування — від сантехнічних і електротехнічних виробів до оздоблювальних матеріалів і медичних приладів. Такий ріст обумовлює необхідність підвищення ефективності, надійності та екологічної безпечності процесів його виробництва. Особливо це стосується етапу піролізу 1,2-дихлоретану (ДХЕ), внаслідок якого утворюється пірогаз — суміш газоподібних продуктів, що містить, окрім цільового хлористого вініле, значну кількість небажаних побічних компонентів, зокрема — твердих частинок (сажі, коксу, полімерізатів).

Для ефективної та стабільної роботи наступних технологічних вузлів (конденсаційних, компресорних, адсорбційних) критично важливо очистити пірогаз від механічних домішок, що може бути досягнуто шляхом гарячого гартування — процесу миттєвого охолодження пірогазу в колоні з рециркуляційною рідиною, зазвичай насиченим розчином хлористого натрію або спеціальними реагентами. Під час гартування відбувається інтенсивна конденсація, охолодження та осадження частинок на поверхні крапель або внаслідок контакту з рідиною.

Ключовим фактором, що визначає ефективність цього процесу, є стабільне підтримання рівня гартувальної рідини в колоні. Відхилення рівня можуть призвести до порушення режиму охолодження, погіршення сепарації,

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		9

гідравлічної нестабільності, збільшення зносу трубопроводів та насосного обладнання, зниження ступеня очистки газу й утворення вторинних забруднень. У гіршому випадку — до аварійного зупинення виробництва.

У зв'язку з цим, однією з пріоритетних задач хімічної автоматизації є розробка сучасних систем автоматичного регулювання рівня гартувальної рідини. Такі системи повинні забезпечувати:

безперервне вимірювання та точну індикацію рівня, швидкодіюче та стабільне регулювання в умовах змін навантаження, стійкість до зовнішніх збурень (коливання тиску, температури, витрат), автоматичне виявлення та обробку аварійних ситуацій, можливість інтеграції в загальну архітектуру автоматизованої системи, управління виробництвом (АСУТП), та простоту обслуговування, гнучкість налаштування та масштабованість.

Актуальність теми посилюється ще й тим, що багато хімічних підприємств в Україні досі використовують застарілі або морально зношені системи керування, що не відповідають сучасним стандартам ефективності та безпеки. Перехід до цифрових технологій автоматизації, з використанням програмованих логічних контролерів (ПЛК), сучасної сенсорики та інтелектуального ПД-регулювання відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів і підвищення конкурентоспроможності українських підприємств на міжнародному ринку.

Таким чином, розробка автоматизованої системи керування рівнем рідини в колоні гарячого гартування пірогазу є не лише науково-технічним завданням, а й практично значущим кроком до модернізації хімічного виробництва, підвищення його енергоефективності, стабільності та екологічної безпечності. Це визначає високу актуальність теми та доцільність проведення відповідних досліджень у рамках бакалаврської роботи.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		10

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Призначення і суть процесу

Процес спрямований на очищення пірогазу, який утворюється під час піролізу, від твердих частинок та конденсованих залишків. Це очищення має ключове значення для запобігання забруднення наступних технологічних етапів, а також для стабільної роботи обладнання та якості кінцевого продукту.

Опис основних етапів процесу:

Охолодження і конденсація домішок: Гарячий пірогаз з температурою близько 490 °С спочатку проходить через випарник, де охолоджується до 240 °С. В результаті цього охолодження відбувається часткова конденсація важких фракцій, що полегшує їх вилучення.

Гартування в спеціальній колоні: Далі пірогаз надходить у колону гарячого гартування через лінію, занурену в дихлоретан — гартувальну рідину, яка активно уловлює тверді частки, що потрапили в газ із піролізної печі. Домішки осідають на дні колони у вигляді осаду.

Розпилення рідини для глибшого очищення: У верхній частині колони дихлоретан розпилюється форсунками, створюючи додатковий очищувальний бар'єр. Це сприяє як охолодженню газової суміші, так і уловлюванню залишкових забруднень.

Контроль робочих параметрів: Для стабільної та безпечної роботи системи здійснюється постійний моніторинг температури, тиску і рівня гартувальної рідини. У разі виходу параметрів за допустимі межі вмикається сигналізація, а при критичних значеннях — автоматично припиняється подача метану.

Кінцевий результат: На виході з колони отримують очищений та охолоджений пірогаз з температурою 162 °С, який може безпечно надходити до наступних стадій технологічного процесу. Ефективність такого очищення дозволяє виділити до 95% газової фази через верхню частину колони.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		11

1.2 Характеристика сировини, реагентів і отриманої продукції

Сировина:

Дихлоретан: Основна сировина, що подається на процес піролізу. Це безбарвна рідина із сильним запахом, що має високу здатність до випаровування та добре змішується з органічними розчинниками. Дихлоретан при високих температурах розкладається на пірогаз, який містить цінні продукти, такі як хлористий вініл.

Реагенти:

Гартувальна рідина (дихлоретан): Використовується як рідина для охолодження та поглинання твердих домішок у колоні "гарячого гартування". Це дозволяє ефективно знижувати температуру пірогазу та відділяти тверді частинки.

Отримана продукція:

Хлористий вініл (рідкий і газоподібний): Основний цільовий продукт процесу піролізу дихлоретану. Хлористий вініл є важливим хімічним попередником для виробництва полівінілхлориду (ПВХ), який широко використовується в пластмасах.

Кубовий залишок: Суміш твердих домішок, які були відокремлені в колоні, та залишкових компонентів, таких як хлористий вініл і хлористий водень. Цей продукт виводиться для утилізації або подальшого розділення.

Несконденсовані пірогази: Гази, що не конденсуються під час охолодження, ідуть на ректифікацію або подальші процеси для виділення корисних компонентів, зокрема хлористого водню та залишкового хлористого вінілу.

1.3 Опис технологічного процесу

Процес спрямований на видалення твердих домішок із пірогазу, який надходить зі змієвика піролізної печі при температурі 490 °С. Газ далі потрапляє у теплообмінний апарат — випарник дихлоретану (поз. Е-004), де охолоджується до 240 °С.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		12

Очищення здійснюється в колоні гарячого гартування (поз. С-001), яка являє собою вертикальний циліндричний апарат висотою 10,5 м та діаметром 1,8 м.

Гартування відбувається завдяки випаровуванню вторинної пари, яка утворюється в основному з 1-хлористого дихлоретану.

Пірогаз подається до колони по трубопроводу діаметром 300 мм, нижче рівня рідини, вертикально вниз у куб колони. Потік газу перенаправляється вгору відбивачами. Такий спосіб введення забезпечує ефективне вилучення твердих частинок, що потрапили з пічного змієвика.

У верхній частині колони пірогаз додатково охолоджується і очищується завдяки розпиленню гартувальної рідини, яка випаровується в контакт з гарячими газами. Розпилення забезпечують два ряди форсунок, розміщених на різних рівнях.

Гартувальна рідина циркулює в системі за допомогою насосів (поз. Р-002А/В). Обсяг перекачування регулюється з урахуванням рівня рідини в кубі колони, при цьому мінімальна витрата підтримується на рівні 7,1 т/год. Газова суміш постійно подається через занурену лінію, що забезпечує майже повне осідання твердих частинок у кубі колони разом із рідиною, яка виводиться як кубовий продукт.

За технологічною схемою, з колони виводиться 95 % газового потоку через верхню частину, а 5 % залишається в кубі. Цей залишок містить дихлоретан, а також незначні кількості хлористого вінілу та хлористого водню. Умови в кубі: температура — 169 °С; розпилювана рідина — 127 °С; пірогаз на виході з верху — 162 °С.

При перевищенні температури в кубі або на виході до 180 °С вмикається сигналізація, а при досягненні 220 °С автоматично блокується подача метану на піролізну піч.

Рівень рідини в колоні (поз. С-001) стабілізується автоматично, з контролем меж: при зниженні до 40 % або підвищенні до 80 % подається сигнал.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		13

Виведення кубового продукту відбувається через фільтри (поз. S-001A/B) на всмоктування насосів (поз. P-003A/B).

Верхня фракція пари (хлористий вініл, водень хлористий, дихлоретан) частково конденсується (до 28 %) у повітряному холодильнику (поз. E-001). Тиск на верху колони сягає 2,8 МПа, при цьому вмикається сигналізація.

Після проходження повітряного холодильника (поз. E-001) утворена пароконденсатна суміш надходить до теплообмінника (поз. E-011), де віддає тепло свіжому дихлоретану, який нагрівається до приблизно 130 °С перед подачею до печі. Водночас відбувається конденсація, і близько 51 % речовин, що виходять із колони, відділяється в розділювальній ємності (поз. V-003). Після E-011 температура становить 126 °С.

Частина сконденсованої рідини з ємності V-003 знову повертається в колону як гартувальна рідина через насос P-002A/B (витрата 18,2 т/год, з регуляцією).

Рівень у ємності V-003 контролюється: при 20 % та 80 % активується сигналізація. Несконденсована частина газів додатково охолоджується в повітряному конденсаторі (поз. E-002), де ще до 70 % пари конденсується перед подальшою ректифікацією.

Тиск верху гартувальної колони складає до 2,8 МПа; при максимальному тиску 2,8 МПа (28 бар) спрацьовує сигналізація, а при збільшенні тиску до 3,2 МПа (32 бар) блокується подача метану на піч.

1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання

У технологічній схемі установки передбачено використання основного обладнання, зокрема гартувальної колони (поз. С-001) в кількості однієї одиниці, призначеної для вилучення твердих домішок із пірогазу (діаметр – 1,8 м, висота – 10,5 м); повітряних холодильників (поз. E-001, E-002) у кількості двох одиниць, що здійснюють часткове конденсування несекондарних парів (площа теплообміну – 32 м²); фільтрів (поз. S-001A/B) у кількості двох одиниць для очищення рідинного кубового продукту;

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		14

відцентрових насосів (поз. Р-003А/В) у кількості двох одиниць, які забезпечують перекачування рідини з потужністю 40,0 кВт і тиском 120 кПа; відцентрових насосів (поз. Р-002А/В) у кількості двох одиниць для подавання гартувальної рідини в колону з потужністю 20,0 кВт і тиском 160 кПа; холодильника (поз. Е-011) в кількості однієї одиниці для підігріву свіжого дихлоретану (площа теплообміну – 32 м²); а також розділювальної ємності (поз. V-003) в кількості однієї одиниці, призначеної для відділення конденсованих продуктів з пірогазу (діаметр – 6 м, висота – 6 м).

1.5 Розробка технологічної схеми автоматизації і її опис

Процес, що розглядається, призначений для очищення пірогазу від твердих домішок та його часткової конденсації з подальшим розділенням компонентів. В основі процесу лежить метод гарячого гартування з використанням спеціалізованої вертикальної колони (поз. С-001), в якій здійснюється охолодження пірогазу, осадження твердих частинок і часткова конденсація парів.

Загальний опис технологічного процесу

Пірогаз, що виходить із змієвика печі піролізу при температурі 490 °С, надходить у змієвик випарника дихлоретану (поз. Е-004), де охолоджується до температури 240 °С. Після цього газовий потік подається в колону гарячого гартування (поз. С-001) через занурену трубу діаметром 300 мм безпосередньо в рідинний куб. Таке введення забезпечує ефективне видалення твердих частинок, які осідають у рідині і видаляються як кубовий продукт.

Колона С-001 має висоту 10,5 м і діаметр 1,8 м. У верхній частині колони знаходиться зона розпилення, яка складається з двох рядів форсунок. Через ці форсунки розпилюється гартувальна рідина — в основному дихлоретан. Вона подається циркуляційними насосами (поз. Р-002А/В), а її витрата регулюється в залежності від рівня рідини в кубі колони.

Мінімально допустима витрата становить 7,1 т/год.

Пірогази, проходячи крізь шар рідини та зону розпилення, охолоджуються, що супроводжується частковим випаровуванням гартувальної рідини.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		15

Основна частина газів (приблизно 95 %) виходить з верху колони при температурі близько 162 °С, а решта 5 % утворює кубовий продукт, що містить дихлоретан, хлористий вініл і хлористий водень. Температура в кубі підтримується на рівні 169 °С, при досягненні 180 °С спрацьовує сигналізація, а при 220 °С блокується подача метану на піч піролізу.

Кубовий продукт виводиться через фільтри (поз. S-1501A/B) на всмоктування насосів (поз. P-003A/B). При зниженні рівня рідини в кубі нижче 400 мм автоматично вимикаються двигуни насосів. Рівень у кубі підтримується в межах 40–80 %.

Газовий потік з верху колони надходить у повітряний холодильник (поз. E-001), де близько 28 % парів конденсується. Далі пароконденсатна суміш проходить через теплообмінник (поз. E-011), де підігріває свіжий дихлоретан, що подається в піч піролізу. Після цього потік надходить у розділювальну ємність (поз. V-003), де відокремлюється приблизно 51 % продуктів. Частина сконденсованої рідини з цієї ємності повертається в колону гартування (18,2 т/год), інша частина направляється на подальшу ректифікацію. Рівень у ємності V-003 також контролюється в межах 20–80 % зі спрацюванням сигналізації при виході за межі.

Несконденсовані рештки газу з V-003 направляються у повітряний конденсатор (поз. E-002), де додатково конденсуються до 70 %, після чого суміш подається на наступні стадії переробки — ректифікацію хлористого водню та вінілхлориду.

Ключові вузли схеми:

- Колона гарячого гартування С-001 — основний апарат для осадження твердих частинок і охолодження пірогазу.
- Насоси Р-002А/В та Р-003А/В — забезпечують циркуляцію гартувальної рідини і видалення кубового продукту.
- Холодильники Е-001, Е-011, Е-002 — ступінчасте охолодження і конденсація парів.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		16

Також діапазон параметрів що не регулюються на пряму: тиск має дорівнювати не більше 2.8 мПа а при досягненні 3.2 повинна зупинитися подача пірогазу в колону. Температура в кубі колони має дорівнювати 169 градусів а в верху колони 162 градуси. При підвищенні температури до 180 градусів зупиняється подача пірогазу.

1.7 Постановка задачі на бакалаврську роботу

Мета роботи — забезпечення стабільної та безаварійної роботи гартувальної колони шляхом регулювання рівня гартувальної рідини для непрямой стабілізації температури і тиску, попередження перевищення критичних параметрів (перегріву, підвищеного тиску), мінімізації витрат гартувальної рідини за збереження якості очищення, автоматичного виявлення та сигналізації аварійних ситуацій, підвищення енергоефективності процесу

Вимоги до системи керування — висока швидкодія та точність регулювання, застосування надійних засобів автоматизації на базі контролера Siemens S7-1500 та витратоміра KROHNE OPTISWIRL 4070, можливість дистанційного керування і інтеграції в загальну систему управління виробництвом, захист від перевантажень і небезпечних режимів роботи

Завдання проєкту — аналіз технологічного процесу очищення пірогазу, розробка структурної схеми системи керування, формування алгоритмів регулювання, вибір засобів автоматизації включно з датчиками, контролерами та виконавчими механізмами, розробка функціональної схеми автоматизації, створення математичної моделі керованого об'єкта, аналіз стійкості та якісних показників системи керування

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		18

Висновки до розділу

у даному розділі проведено комплексний аналіз процесу очищення пірогазу методом гарячого гартування, встановлено, що основним технічним апаратом для ефективного видалення твердих домішок і часткової конденсації парів є гартувальна колона, детально описано її будову та принцип дії, обґрунтовано вибір ключових технологічних параметрів таких як температура, тиск і рівень рідини, сформовано загальну технологічну схему автоматизації процесу з виділенням основних елементів контролю, визначено, що стабільність і безпечність процесу значною мірою забезпечується регулюванням рівня гартувальної рідини, який є базовим об'єктом керування в автоматизованій системі

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		19

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Визначення характеристик об'єкта автоматизації

Як уже згадувалося, ключовим елементом технологічної установки є апарат гарячого гартування, який виконує функцію очищення пірогазу від твердих включень. Одним із критичних параметрів для стабільної роботи цього апарата є рівень гартувальної рідини, яку регулюють шляхом контролю подачі рідкого хлористого вінілу. Для ефективної автоматизації цього процесу потрібно розробити локальну систему керування, яка дозволить підтримувати заданий рівень із урахуванням змін у технологічному режимі.

На початковому етапі слід дослідити динамічні характеристики гартувальної колони як об'єкта керування. Для цього розробляється її математична модель відповідно до методичних рекомендацій. Конструктивно апарат являє собою вертикальний сталевий циліндр заввишки 10,5 м і діаметром 1,8 м. Внутрішній об'єм частково заповнений гартувальною рідиною — рідким хлористим вінілом із густиною $\rho = 910,6 \text{ кг/м}^3$. Робочий рівень рідини зазвичай утримується в межах 5–6 м.

Подача рідини в колону здійснюється трубопроводом через керований вентиль, для якого відомі основні характеристики: коефіцієнт витрати становить $\alpha = 0,75$, а площа живого перерізу $f_0 = 0,03 \text{ м}^2$. Тиск у трубопроводі дорівнює $P_2 = 38\,000 \text{ кг/м}^2$.

З точки зору автоматичного регулювання рівня, гарячогартувальна колона може бути представлена як одноланковий ємнісний об'єкт. Поведінка системи при зміні витрати рідини описується аперіодичним перехідним процесом, що дозволяє спростити побудову регулятора в подальшому.

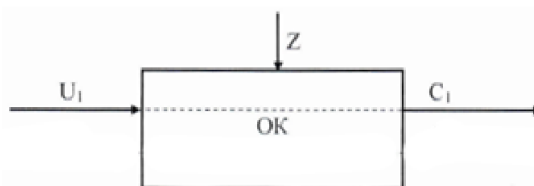


Рисунок 2.1 Схема об'єкту керування

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		20

OK - об'єкт керування (гартувальна колона);

U- потік рідкого ВХ (гартувальної рідини) в гартувальну колону;

C_{col} - рівень гартувальної рідини в колоні;

Z - збурення.

$$T_o \frac{dH}{dt} + \Delta H = k_o \Delta G_{vh} \quad (2.2)$$

Рівняння матеріального балансу.

$T_o = \frac{F}{c}$ стала часу, що характеризує інерційність об'єкту, с.

F - площа поперечного перетину, m^2 . c - коефіцієнт пропорційності, який описує зміну витрати при зміні рівня;

k_o - коефіцієнт підсилення;

$$k_o = \frac{1}{c}$$

G_{vh} = витрата гартувальної рідини на вході в колону.

Побудова математичної моделі передбачає визначення величин T_o та k_o , що входять у рівняння. Для цього слід знайти витрату при різних рівнях рідини:

$$H_1 = 5 \text{ м та } H_2 = 6 \text{ м.}$$

Витрата з колони визначається за формулою:

$$G_{vyh} = \alpha \times f_o \sqrt{\frac{2}{\rho}} (P_1 - P_2), \frac{m^3}{c} \quad (2.3)$$

де ρ – густина рідини ($910,6 \text{ кг/м}^3$), α – коефіцієнт витрати (0,75), f_o – площа отвору ($0,03 \text{ м}^2$), P_1 – гідростатичний тиск у колоні, P_2 – тиск у трубопроводі (38000 кг/м^2). Розрахунок витрат при двох рівнях

При рівні $H_1 = 5$ метрів тиск у рідині розраховується за формулою:

$$P_1 = \rho g H_1 = 910,6 \times 10 \times 5 = \frac{45530 \text{ кгс}}{m^2} \quad (2.4)$$

P_1 - тиск рідини в колоні, гідростатичний тиск стовпа рідини.

де g - прискорення вільного падіння, приймаємо $g = 10 \text{ м/с}^2$.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		21

Тоді витрата рідини з колони становить:

$$G_{vyh1} = \alpha \times f_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}} (P_1 - P_2) = 0,75 \times 0,03 \times \sqrt{2 \times \frac{45530 - 38000}{910,6}} = 0,091 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.5)$$

При рівні $H_2 = 6$ метрів отримаємо збільшений гідростатичний тиск P'_1 .

$$P'_1 = \rho g H_2 = 910,6 \times 10 \times 6 = 54636 \text{ кгс}/\text{м}^2; \quad (2.6)$$

Визначимо для даного тиску витрату гартувальної рідини з колони:

$$G_{vyh2} = \alpha \times f_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}} (P'_1 - P_2) = 0,75 \times 0,03 \times \sqrt{2 \times \frac{54636 - 38000}{910,6}} = 0,135 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.7)$$

Коефіцієнт пропорційності c , що характеризує зміну витрати в залежності від зміни рівня, обчислюється як:

$$C_{col} = \frac{\Delta G_{vyh}}{\Delta H} = \frac{(G_{vyh.2} - G_{vyh.1})}{H_2 - H_1} = \frac{0,135 - 0,091}{6 - 5} = 0,044 \quad (2.8)$$

Звідси коефіцієнт підсилення:

$$k_o = \frac{1}{c} = \frac{1}{0,044} \approx 22. \quad (2.9)$$

З огляду на використання різних одиниць тиску у практичних умовах (кПа), значення коефіцієнта необхідно скоригувати до $k_o \approx 0,022$.

Визначаємо постійну частоту $T_o = \frac{F}{c}$;

де F - площа поперечного перерізу колони, яку визначаємо як площу круга.

Колона має форму циліндра з діаметром 1,8 м і висотою 10,5 м. Площа поперечного перерізу колони розраховується як площа круга:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = 3,14 \times \frac{1,8^2}{4} = 2,54 \text{ м}^2. \quad (2.10)$$

Постійна часу T_o визначається як

$$T_o = \frac{F}{c} = \frac{2,54}{0,044} = 57,73 \text{ с} = 0,96 \text{ хв}. \quad (2.11)$$

Таким чином, остаточне диференціальне рівняння, що описує зміну рівня рідини в колоні у відповідь на зміну подачі, має вигляд:

$$0,96 \frac{dH}{dt} + \Delta H = 0,022 \Delta G_{вх}. \quad (2.12)$$

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		22

Це рівняння описує зміну рівня рідини в колоні залежно від зміни подачі гартувальної рідини. Правильність моделі доцільно перевірити за допомогою програмного забезпечення для розрахунку математичної моделі.

У процесі синтезу системи автоматичного керування необхідно мати точну математичну модель об'єкта керування, яка відображає його динамічні властивості. Для цього було створено програму, що дозволяє автоматизувати розрахунок параметрів моделі гартувальної колони — зокрема, визначення коефіцієнта підсилення та постійної часу об'єкта, на основі фізико-технічних характеристик.

Розроблена програма дозволила спростити та автоматизувати етап побудови математичної моделі гартувальної колони. Вона забезпечує точний розрахунок основних параметрів, знижує ймовірність помилок при ручному обчисленні, та служить основою для подальшого моделювання системи керування. Програма розроблена студентом Сімків М.І. на основі ПЗ яке застосовується в Калуському політехнічному фаховому коледжі.

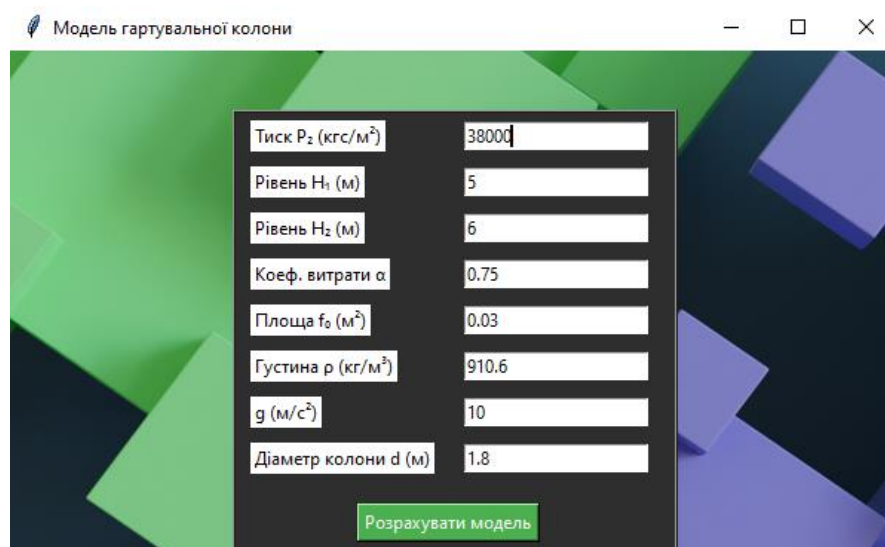


Рисунок 2.2 - Діалогове вікно програми для розрахунку математичної моделі гартувальної колони

```

Площа F = 2.545 м²
G1 = 0.0915 м³/с
G2 = 0.1360 м³/с
c = 0.04450
k0 = 22.46994 (= 0.02247 після масштабування)
T0 = 57.18 с (= 0.95 хв)

Математична модель:
0.95 dH/dt + ΔH = 0.0225 ΔG_вх

```

Рисунок 2.3 - Діалогове вікно програми з розрахунками математичної моделі гартувальної колони

В результаті розрахунку визначили, що $T_0 = 57,73\text{C} \approx 0,96\text{хв}$; $k_0 = 22,4 \approx 22$.

Фактично результати розрахунку свідчили, що підтверджує їх достовірність.

Записуємо остаточно математичну модель гартувальної колони

$$0,96 \frac{dH}{dt} + \Delta H = 0,022 \Delta G_{\text{вх}} \quad (2.13)$$

Використаємо перетворення Лапласа і запишемо динамічні властивості гартувальної колони через передатну функцію, замінивши знак диференціювання $\frac{d}{dt}$ на оператор p .

$$W(P) = \frac{k_0}{T_0 p + 1} = \frac{0.022}{0.96 p + 1}; \quad (2.14)$$

Висновки до розділу

Розроблено математичну модель гартувальної колони, яка описує динаміку рівня гартувальної рідини. Колона представлена як аперіодична ланка другого порядку. Визначено коефіцієнт підсилення об'єкта та постійну часу, які є критично важливими для побудови ефективного регулятора. Проведено розрахунок витрати рідини при змінних рівнях, що дозволило сформулювати передатну функцію об'єкта. Побудована модель пройшла перевірку на достовірність через співставлення з результатами програмного моделювання, що свідчить про її коректність. Отримані дані стали основою для синтезу системи керування.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		24

3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Визначення якісних показників перехідного процесу

Одним із основних режимних параметрів у процесі очищення пірогазу від твердих включень є рівень гартувальної рідини в колоні. Його стабілізація здійснюється за допомогою регулювання витрати рідкого хлористого вінілу, що подається на процес гартування. Для реалізації задачі контролю та підтримання стабільних технологічних параметрів у проєкті передбачено використання мікропроцесорного контролера, який здійснює обробку сигналів за універсальним ПІД-законом регулювання. Додатково для цілей аналізу та вибору оптимального алгоритму керування буде також реалізовано варіант із ПІ-регулятором з метою порівняння ефективності обох підходів.

Для визначення параметрів налаштування контурів автоматичного регулювання застосовується програмне середовище Matlab Simulink. Із використанням відповідних бібліотек платформи Simulink формується структурна модель системи автоматичного керування. Динамічні характеристики гартувальної колони, в якій проходить процес вилучення твердих домішок, подано у вигляді аперіодичної ланки другого порядку з відповідною передатною функцією.

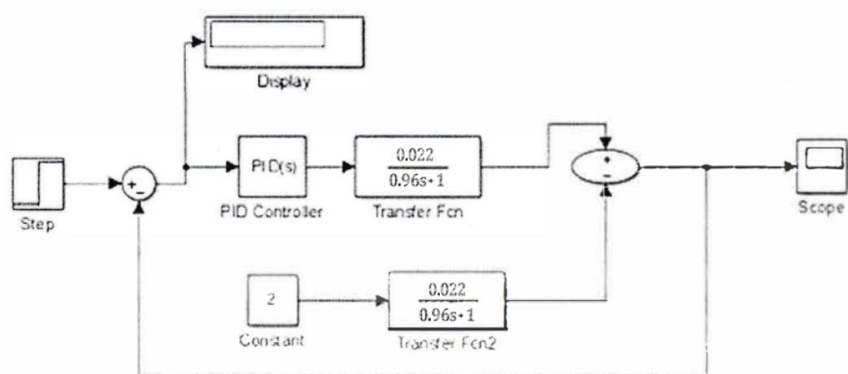


Рисунок 3.1 - Модель системи автоматичного регулювання рівня в гартувальній колоні в програмному середовищі "MatlabSimulink"

На основі побудованої моделі виконується запуск ПІД-регулятора з подальшим моделюванням роботи системи. Проводиться налаштування

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		25

параметрів регулятора шляхом корекції перехідного процесу з метою досягнення необхідних динамічних характеристик системи.

Параметрів налаштування PID-контролера в діалоговому вікні Matlab/Simulink:

Proportional (P) = 52.8602

Integral (I) = 115.40

Derivative (D) = 28.85

У результаті моделювання остаточно визначено параметри налаштування регулятора: коефіцієнт підсилення $K_p = 52,86$, інтегральна постійна часу $T_i = 115,4$ секунди (1,92 хвилини), та диференційна постійна часу $T_d = 28,85$ секунди (0,48 хвилини).

Оцінка якісних показників перехідного процесу є важливим етапом у проектуванні системи автоматичного керування, оскільки саме ці характеристики визначають ефективність і надійність функціонування всієї керуючої підсистеми в умовах змін технологічного навантаження.

Ці показники дозволяють оцінити ефективність налаштованого регулятора, зокрема — швидкодію, точність і стабільність регулювання. Беручи розрахунки вище створюємо графік перехідного процесу.

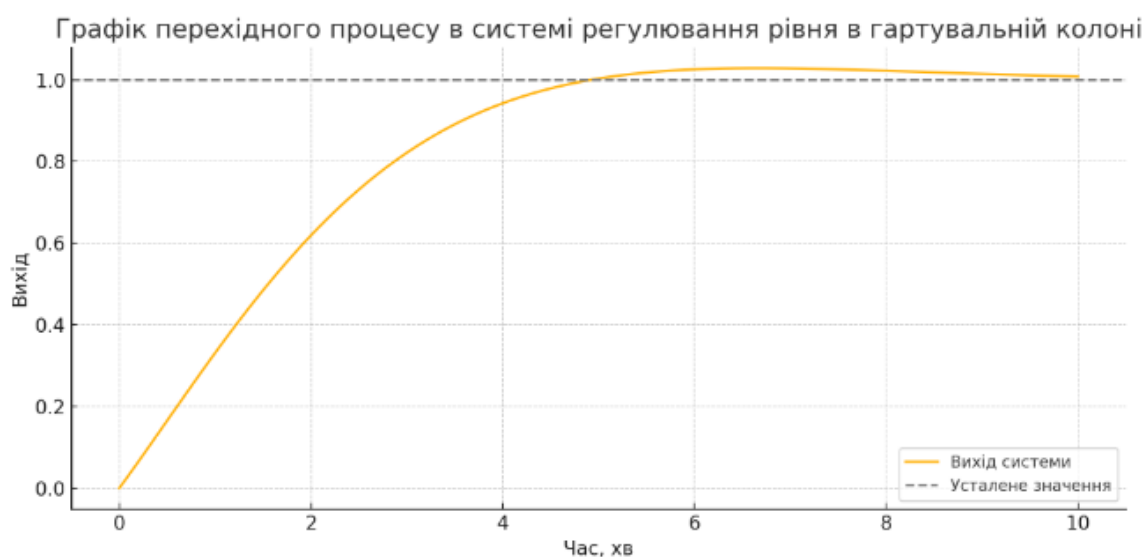


Рисунок 3.2 - Графік перехідного процесу в системі регулювання рівня в колоні з PID законом регулювання

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		26

Графік перехідного процесу, побудований у масштабі часу в хвиликах, що відображає реакцію системи автоматичного регулювання рівня в колоні на одиничне збурення. Він побудований на основі таких параметрів:

ПІД-регулятор:

Пропорційний коефіцієнт $K_p = 52,86$

Інтегральна постійна $T_i = 115,4 \text{ с} = 1,92 \text{ хв}$

Диференціальна постійна $T_d = 28,85 \text{ с} = 0,48 \text{ хв}$

Передатна функція об'єкта керування (гартувальна колона):

Аперіодична ланка другого порядку

Постійна часу $T_o = 57,73 = 0,96 \text{ хв}$.

Підсилення $k_o = 0,022$

Детальне визначення якісних показників перехідного процесу:

1. Час розгону (T_{roz}): Час, за який вихід системи досягає 90–95% від усталеного значення. $\approx 1,4 \text{ хв}$ (вихід досягає $\sim 0,95$ відносної одиниці).

2. Час перехідного процесу ($T_{p.p.}$): Час, за який система входить у допуск ($\pm 5\%$ навколо 1) і залишається в ньому. $\approx 3,7 \text{ хв}$, після чого коливання не виходять за межі.

3. Перерегулювання визначається як відсоток перевищення максимального значення відносно усталеного:

$$Pr = \frac{y_{max} - y_{ust.}}{y_{ust.}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Максимальне значення $\approx 1,038$, отже:

$$Pr \approx \frac{1,038 - 1}{1} \times 100\% = 3,8\% \quad (3.2)$$

Сигнал стабілізувався на рівні 1,00, отже: Статична похибка = 0%

Характер процесу: Перехідний процес має слабо коливальний характер з добрим демпфуванням. Коливання швидко згасають, система стабілізується без автоколивань.

Отриманий графік і визначені якісні показники підтверджують, що система автоматичного регулювання з налаштованим ПІД-регулятором забезпечує високу якість регулювання:

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		27

Швидке реагування без перерегулювання.

Повна компенсація збурень без залишкової похибки.

Плавний і стабільний перехідний процес.

Тепер зробимо аналогічний графік і розрахунки для PI-регулятора

Запускаємо PI-контролер, моделюючи роботу контуру регулювання рівня.

Коректуючи графік перехідного процесу, остаточно вибираємо параметри налаштування регулюючого контуру.

Параметрів налаштування PID-контролера в діалоговому вікні Matlab/Simulink:

Proportional (P) = 52.8602

Integral (I) = 115.40

Таким чином параметри налаштування регулюючого контуру становлять:

$K_p = 52,86$; $T_i = 115,4 \text{ с} = 1,92 \text{ хв}$;

Беручи розрахунки вище створюємо графік перехідного процесу.

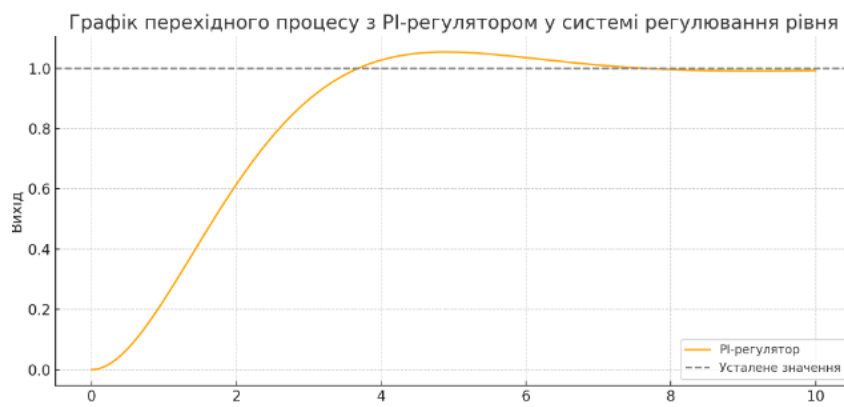


Рисунок 3.3 - Графік перехідного процесу в системі регулювання рівня в колоні з PI законом регулювання

PI-регулятор:

Пропорційний коефіцієнт $K_p = 52,86$

Інтегральна постійна $T_i = 115,4 \text{ с} = 1,92 \text{ хв}$

Передатна функція об'єкта керування (гартувальна колона):

Аперіодична ланка другого порядку

Постійна часу $T_o = 57,73 = 0,96 \text{ хв}$.

Підсилення $k_o = 0,022$

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		28

Детальне визначення якісних показників перехідного процесу:

1. Час розгону (T_{roz}): Час, за який вихід системи досягає 90–95% від усталеного значення. $\approx 1,7$ хв (вихід досягає $\sim 0,95$ відносної одиниці).

2. Час перехідного процесу ($T_{p.p.}$): Час, за який система входить у допуск ($\pm 5\%$ навколо 1) і залишається в ньому. $\approx 4,6$ хв, після чого коливання не виходять за межі.

3. Перерегулювання: Визначається як відсоток перевищення максимального значення відносно усталеного:

$$Pr = \frac{y_{max} - y_{ust.}}{y_{ust.}} \times 100\% \quad (3.3)$$

Максимальне значення $\approx 1,054$, отже:

$$Pr \approx \frac{1,054 - 1}{1} \times 100\% = 5,4\% \quad (3.4)$$

Сигнал стабілізувався на рівні 1,00, отже: Статична похибка = 0%

Характер процесу: Перехідний процес має більші коливання в порівнянні з графіком з PID законом регулювання. Коливання згасають, система стабілізується без автоколивань.

Отриманий графік і визначені якісні показники підтверджують, що система автоматичного регулювання з налаштованим PI-регулятором забезпечує регулювання але воно гірше ніж у системи з PID-регулятором:

Перерегулювання в межах допустимого, але гірше ніж у системи з PID.

Повна компенсація збурень без залишкової похибки.

Перехідний процес менш плавний і має більші коливання.

3.2 Синтез ефективної системи автоматичного керування процесом очищення пірогазу від твердих домішок

На основі результатів моделювання в середовищі MATLAB/Simulink побудовано графіки перехідних процесів для системи регулювання рівня в гартувальній колоні з використанням PID- та PI-регулятора. Порівняльна таблиця основних якісних показників подана нижче:

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		29

Таблиця 3.1 – порівняння PI і PID регулятора.

Показник	PID-регулятор	PI-регулятор
Час розгону, хв	≈ 1,4	≈ 1,7
Час перехідного процесу, хв	≈ 3,7	≈ 4,6
Перерегулювання, %	≈ 3,8	≈ 5,4
Статична похибка, %	0	0

За результатами аналізу встановлено, що система з ПІД-регулятором демонструє кращі динамічні характеристики. Зокрема, вона характеризується меншим часом розгону, швидшою стабілізацією вихідного сигналу в межах допустимого відхилення ($\pm 5\%$) та меншим значенням перерегулювання.

Система з PI-регулятором має дещо повільнішу реакцію на збурення та вище перерегулювання, хоча й забезпечує відсутність статичної похибки.

Для реалізації системи автоматичного регулювання рівня гартувальної рідини в колоні гарячого гартування у межах даного проєкту найбільш доцільним є використання PID-регулятора.

Це обумовлено як характером самого технологічного процесу, так і результатами моделювання, яке було проведено в середовищі MATLAB Simulink. В процесі гартування стабільність рівня рідини безпосередньо впливає на ефективність очищення пірогазу, забезпечення теплового режиму та безпечну експлуатацію обладнання, тому система керування повинна забезпечувати достатню швидкодію, точність та стійкість.

Моделювання показало, що система з PID-регулятором має кращі динамічні властивості порівняно з PI-регулятором. Зокрема, час розгону становить приблизно 1,4 хвилини, а час перехідного процесу – близько 3,7 хвилини, що свідчить про швидку реакцію системи на збурення. Перерегулювання не перевищує 3,8 %, що є прийнятним для подібного об'єкта керування, а статична похибка відсутня. У порівнянні з цим система з PI-регулятором характеризується повільнішою динамікою, більшим часом перехідного процесу (приблизно 4,6 хвилини) та більшим перерегулюванням, яке

сягає 5,4 %. Така поведінка менш бажана в умовах необхідності забезпечення стабільної роботи гартувальної колони при змінних навантаженнях і технологічних параметрах.

З технічної точки зору, реалізація PID-регулятора на базі програмованого логічного контролера Siemens S7-1500 є повністю доступною та не викликає ускладнень, оскільки дане обладнання підтримує реалізацію ідеального алгоритму PID-регулювання із налаштуванням відповідних параметрів. Враховуючи це, вибір PID-регулятора дозволяє забезпечити не лише високу точність регулювання, а й своєчасну реакцію на зовнішні і внутрішні збурення, що гарантує стабільність рівня гартувальної рідини в колоні, безпечний хід технологічного процесу та надійну роботу системи в цілому.

Таким чином, на підставі техніко-економічних, динамічних і функціональних характеристик системи автоматичного регулювання, застосування PID-регулятора є найбільш обґрунтованим і відповідає вимогам до ефективності, надійності та точності регулювання, що ставляться до сучасних автоматизованих систем управління хімічними процесами.

Для забезпечення хорошої ефективності процесу очищення пірогазу від твердих домішок необхідно спроектувати систему автоматичного регулювання рівня гартувальної рідини в колоні. Запропоновано використання послідовного коректуючого контуру, який реалізує алгоритм керування за ПІД-законом. Структурна схема системи автоматичного керування зображена нижче.

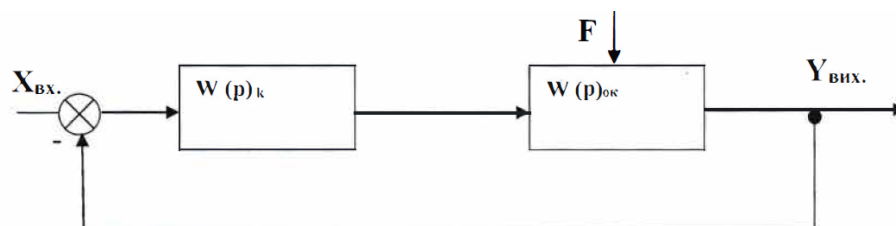


Рисунок 3.4 - Структурна схема системи автоматичного керування

Для отримання повної передатної функції системи спочатку визначається передатна функція регулюючого (коректуючого) контуру.

В основі реалізації автоматизованого керування лежить мікропроцесорний контролер, який функціонує за принципом PID-регулювання. Регулятор реалізовано у формі ідеальної структурної схеми, яка складається з трьох паралельно з'єднаних ланок: пропорційної, інтегруючої та диференціюючої.

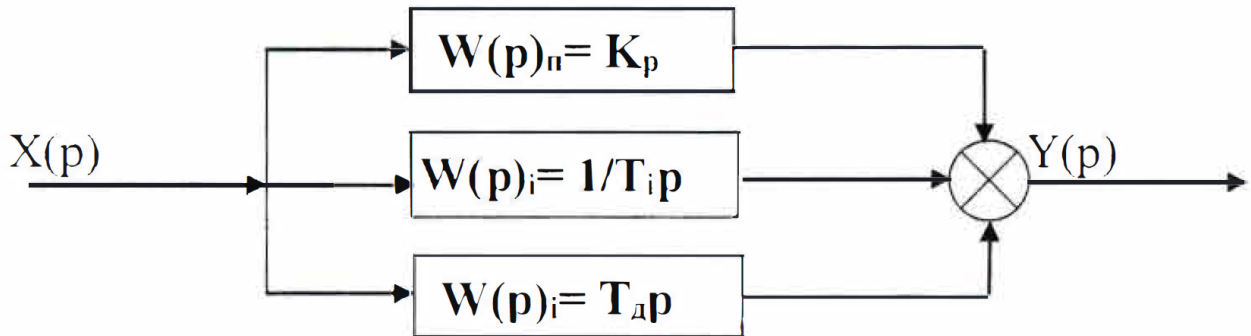


Рисунок 3.5 - Структурна схема PID-регулятора

Передатна функція ПІД-регулятора має вигляд:

$$W(p)_K = W(p)_P + W(p)_I + W(p)_D = k_p + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p = T_i T_d p^2 + k_p T_i + 1}{T_i p}; \quad (3.5)$$

Передатна функція гартувальної колони

$$W(P) = \frac{k_o}{T_o p + 1} = \frac{0.022}{0.96 p + 1}; \quad (3.6)$$

Використовуючи загальну структурну схему замкненої системи автоматичного регулювання, визначається її передатна функція:

$$W(p) = \frac{k_o k_p (T_i p + 1)}{T_i p (T_o p + 1) + k_o (T_i T_d p^2 + k_p T_i + 1)}; \quad (3.7)$$

Підставляючи відомі числові значення параметрів об'єкта та налаштувань регулятора для визначення передатної функції:

$$K_p = 52,86; T_i = 115,4 \text{ с} = 1,92 \text{ хв}; T_d = 28,85 \text{ с} = 0,48 \text{ хв}.$$

$$k_o = 0,022. T_o = 0,96 \text{ хв}.$$

отримуємо аналітичний вираз передатної функції:

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		32

3.4 Дослідження системи на стійкість

Перевірка стійкості спроектованої системи автоматичного керування є обов'язковим етапом її аналізу, оскільки саме стійкість є головною вимогою до таких систем. Для визначення стійкості проаналізуємо корені характеристичного рівняння. Система вважається стійкою, якщо всі корені її характеристичного рівняння мають від'ємну дійсну частину. У такому разі будь-яке відхилення регульованої величини із часом буде згасати до нуля, що гарантує правильне функціонування регулюючого контуру.

Розглянемо квадратне характеристичне рівняння, яке описує динамічні властивості системи:

$$1,18635p^2 + 4,1528p + 0,022$$

$$P_{1,2} \frac{-4,1528 \pm \sqrt{4,1528^2 - 4 \times 1,18635 \times 0,022}}{2 \times 1,18635} = \frac{-4,1528 \pm 4,1398}{2,3727}; \quad (3.10)$$

$$P_1 \frac{-4,1528 + 4,1398}{2,3727} = -0,0055; \quad (3.11) \quad P_2 \frac{-4,1528 - 4,1398}{2,3727} = -3,495; \quad (3.12)$$

Обидва корені характеристичного рівняння є дійсними та від'ємними, що підтверджує стійкість розробленої системи автоматичного керування.

Для додаткової перевірки системи доцільно скористатися критерієм Михайлова. У відповідному діалоговому вікні програмного забезпечення вводимо значення коефіцієнтів характеристичного рівняння. Із варіюванням частоти ω у межах від нуля до нескінченності розраховуються координати точок годографа. Паралельно з обчисленнями програма будує сам годограф, що дозволяє візуально оцінити відповідність траєкторії критерію стійкості.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		34

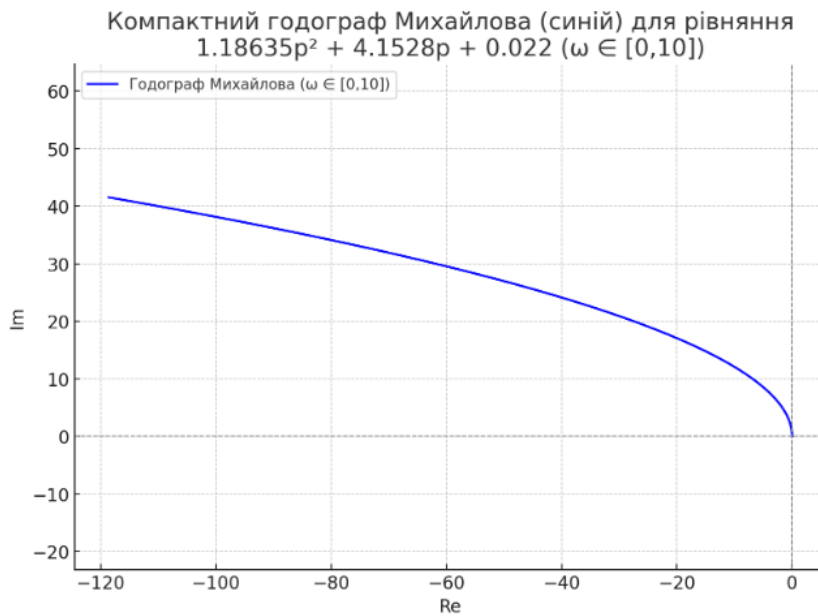


Рисунок 3.6 - Годограф Михайлова

Годограф Михайлова (масштаб зменшено в 20 разів, висока точність)

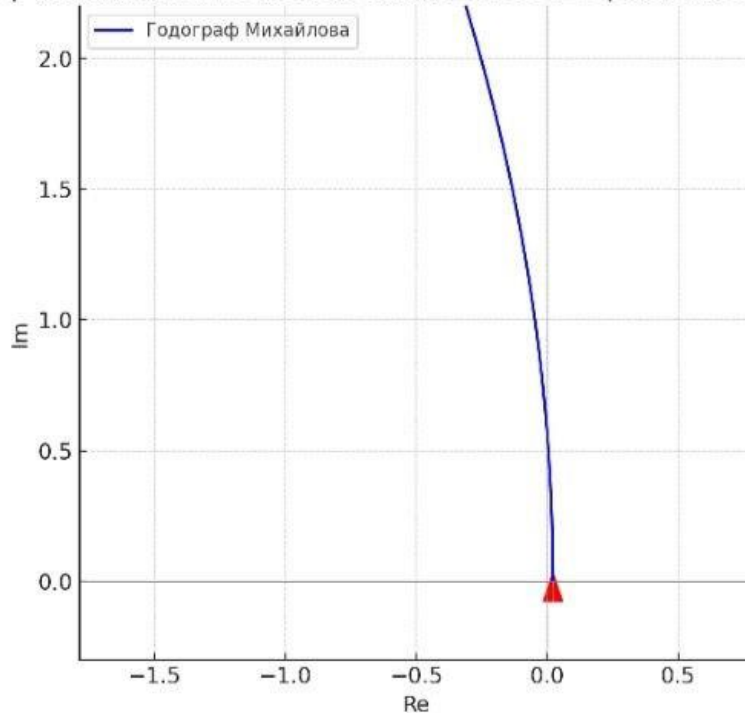


Рисунок 3.7 - Годограф Михайлова у зменшеному масштабі

Крива чітко починається праворуч (у точці 0.022 на осі Re). Якщо годограф проходить праву півплощину з правильною орієнтацією — система стійка. У цьому випадку він починається в правій півплощині та повертає проти годинникової стрілки, що підтверджує стійкість системи.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		35

Висновки до розділу

На основі побудованої моделі здійснено синтез автоматичної системи регулювання рівня рідини. Обґрунтовано вибір ПД-регулятора, параметри якого підбрані за допомогою середовища Matlab/Simulink. Проведено аналіз якісних показників перехідного процесу (час розгону, перерегулювання, статична похибка), що підтвердив ефективність налаштувань. Досліджено різні типи структур керування, серед яких вибрано класичну одноконтурну систему зі зворотним зв'язком як найбільш придатну до реалізації на ПЛК. Додатково підтверджено стійкість спроектованої системи як аналітично, так і за допомогою критерію Михайлова. Це доводить, що розроблена система забезпечує високу якість регулювання при змінних технологічних умовах.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		36

4 РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ПО АВТОМАТИЗАЦІЇ

4.1 Розробка і опис функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації описує систему автоматичного контролю та регулювання процесу очищення пірогазу в гартувальній колоні С-001. Основною метою автоматизації є забезпечення стабільної роботи апарата шляхом контролю та підтримання технологічних параметрів у допустимих межах: витрати, тиску, температури та рівня гартувальної рідини.

Об'єктом автоматизації є вертикальна колона С-001, в якій здійснюється процес гарячого гартування пірогазу з використанням гартувальної рідини. У колоні передбачено встановлення вимірювальних приладів: витратомір (FE) на вході пірогазу, датчик тиску у верхній частині колони, температурні датчики (TE у кубі та TE у верхній частині колони), датчик рівня рідини (LE), а також витратомір (FE), який вимірює кількість відкачуваної гартувальної рідини разом із твердими домішками.

Отримані з датчиків сигнали у вигляді уніфікованого струмового сигналу 4–20 мА подаються на програмований логічний контролер Siemens S7-1500. Контролер виконує аналіз значень параметрів, здійснює автоматичне регулювання рівня рідини в колоні за допомогою ПД-регулятора, формує сигнали керування виконавчими механізмами (наприклад, регулюючим вентилем подачі рідини), а також ініціює сигналізацію в разі перевищення допустимих меж.

Для забезпечення безпечної та надійної роботи передбачено гальванічне розділення сигналів, аварійне відключення обладнання при критичних відхиленнях параметрів (наприклад, тиск понад 3,2 МПа, температура понад 220 °С або рівень нижче 40 %), а також індикація стану системи на дисплеї або панелі оператора. Через інтерфейс оператор має змогу здійснювати моніторинг усіх параметрів у реальному часі, переглядати аварійні події та, при потребі, вручну втручатися в керування

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		37

Таким чином, функціональна схема забезпечує повноцінний цикл автоматизації: від вимірювання фізичних параметрів до їх обробки, регулювання і сигналізації, створюючи надійну і гнучку систему для підтримання якісного та безпечного технологічного процесу очищення пірогазу.

Функціональна схема

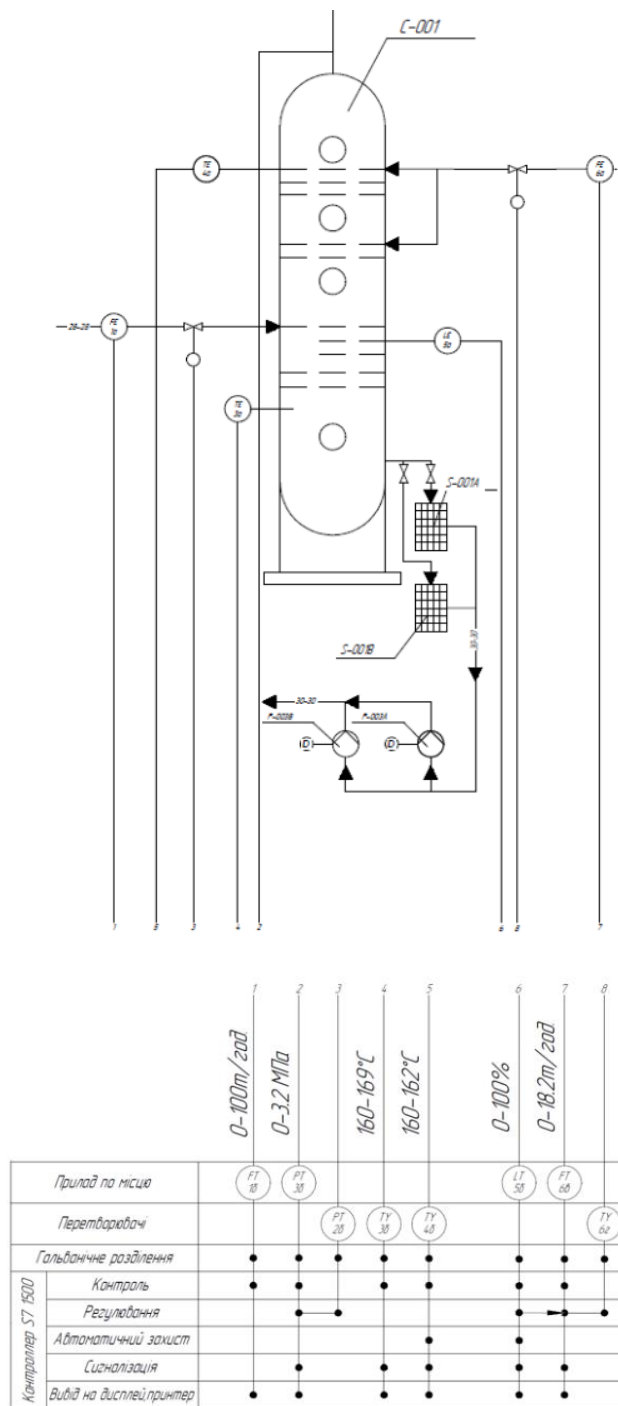


Рисунок 4.9 – Функціональна схема автоматизації процесу очищення пірогазу від твердих домішок

4.2 Вибір технічних засобів автоматизації

KROHNE OPTISWIRL 4070/C DN 100

OPTISWIRL 4070 забезпечує надійне вимірювання робочої витрати, стандартної об'ємної і масової витрати провідних і непровідних рідин, газів і пари навіть при коливаннях температури і тиску.

Технічні характеристики:

Вбудована функція компенсації по температурі і тиску

Діапазон вимірювання: для чисел Рейнольдса 10000...2300000

Робоча температура: -40 ... +240 °С

Робочий тиск: до 100 бар

Похибка вимірювання: $\pm 0,75\%$ (для рідин), $\pm 1,0\%$ (для газів і пари) в залежності від числа Рейнольдса

Вимоги до витратоміра:

1. Вимірювання витрати рідини (дихлоретану) в діапазоні не менше 0–18.2 т/год.
2. Стійкість до робочих температур до 180–200 °С, що характерно для циркуляції гартувальної рідини.
3. Робочий тиск не менше 3,0 МПа, з урахуванням допустимого перевищення.
4. Вихідний сигнал 4–20 мА для підключення до аналогового входу ПЛК.
5. Сумісність із хімічно активними середовищами.

Аналіз відповідності:

OPTISWIRL 4070/C є сучасним вихровим витратоміром, який підтримує вимірювання витрати рідин, газів та пари. Він має розширений температурний діапазон від -40 до +240 °С, що повністю перекриває умови технологічного процесу. Максимальний робочий тиск до 100 бар дозволяє експлуатацію без ризику перевантаження. Прилад має вбудовану температурну і тискову компенсацію, що підвищує точність у нестабільних режимах. Вихідний сигнал у стандарті 4–20 мА забезпечує сумісність із ПЛК Siemens S7-1500. Корпус приладу виготовлений з корозійностійких матеріалів, сумісних із дихлоретаном. Таким чином, прилад повністю відповідає умовам експлуатації.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		39



Рисунок 4.1 – Витратомір KROHNE OPTISWIRL 4070/C DN 100

ПД100-121

Вихідний сигнал датчика – уніфікований сигнал 4...20 мА постійного струму.

Верхня межа тиску, що вимірюється (ВМВ) – від 10 кПа до 4,0 МПа.

Перевантажувальна здатність – не менше 200 % ВМВ.

Ступінь захисту корпусу та електричного з'єднувача перетворювача – IP65.

Вимоги до датчика тиску:

1. Діапазон вимірювання до 3,5 МПа з запасом по перевантаженню.
2. Вихідний сигнал 4–20 мА.
3. Стійкість до агресивного газового середовища (пари дихлоретану, водень хлористий).
4. Точність не гірше 1 % від верхньої межі вимірювання.
5. Ступінь захисту не нижче IP65.

Аналіз відповідності:

Датчик ПД100-121 призначений для промислових умов експлуатації, має широкий діапазон тиску до 4,0 МПа та перевантажувальну здатність понад 200 %. Він забезпечує уніфікований струмовий вихід 4–20 мА, що відповідає вимогам для аналогового входу контролера. Ступінь захисту IP65 дозволяє безпечну експлуатацію у вологому та агресивному середовищі. Датчик може бути виготовлений у спеціальному виконанні з захистом від впливу хімічних речовин,

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		40

що робить його придатним для вимірювання тиску в парогазовій фазі. Таким чином, прилад повністю відповідає технічним вимогам.



Рисунок 4.2 - Датчик тиску ПД100-121

Samson 6111

Технічні характеристики:

Тип: електропневматичні перетворювачі

Варіанти виконання:

Samson 6111-1 - вибухозахист АTEX EEx ia

Вхід: 4...20 мА

Вихід: 0,2...1 бар

Вихідний сигнал: до 8 бар

Тиск живлення: 0,4...10 бар

Температура довкілля: -20 - +70 °С

Ступінь захисту: IP 20, IP 65

Категорія: електропневматичні перетворювачі

Вимоги до перетворювача:

1. Прийом сигналу 4–20 мА від ПЛК.
2. Вихідний пневматичний тиск 0,2–1,0 бар для управління виконавчим механізмом.
3. Робота в агресивному середовищі, бажано з вибухозахистом.
4. Надійність, стабільність вихідного тиску.
5. Сумісність з промисловими пневмолініями.

Аналіз відповідності:

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		41

Модель Samson 6111 має декілька варіантів виконання, включаючи вибухозахищене. Вхідний електричний сигнал 4–20 мА та вихідний пневматичний тиск у діапазоні 0,2–1 бар дозволяють керувати пневматичними клапанами або іншими виконавчими механізмами. Прилад стабільно працює при температурі навколишнього середовища до +70 °С і має захист IP65. Його характеристики повністю відповідають вимогам до роботи у системі керування витратою гартувальної рідини.



Рисунок 4.3 – Електропневматичний перетворювач Samson 6111
CLS-23N

Технічні параметри:

Здатність виявляти рідкі речовини, які здатні проводити струм або є діелектриками

Чутливість регулюється за допомогою магнітної ручки

Можливість прямої установки в різні ємності та труби

Мають наступні виходи: S, PNP і NAMUR (вибухонебезпечні середовища)

Здатність витримувати високі температури і тиск до 70 кгс/см²

Спосіб кріплення: різьблення метричне (M18 і M20), дюймове

Вимоги до датчика рівня:

1. Здатність точно виявляти рівень гартувальної рідини (дихлоретан) у вертикальній колоні.
2. Стійкість до високого тиску до 3.5 МПа і температури до 180 °С.
3. Надійна робота при наявності парів і конденсату.
4. Вихідний сигнал, сумісний з ПЛК (PNP, NAMUR або струм 4–20 мА).
5. Можливість гнучкого монтажу (різьбове з'єднання, вертикальна установка).

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		42

Аналіз відповідності:

Датчик CLS-23N здатен працювати з як провідними, так і діелектричними рідинами, що дозволяє використовувати його для дихлоретану. Він витримує тиск до 70 кгс/см² (≈ 7 МПа), що значно перевищує необхідні параметри. Датчик має різні вихідні інтерфейси, зокрема PNP та NAMUR, що дозволяє підключення до цифрових входів ПЛК. Температурна стійкість та захищене виконання забезпечують стабільну роботу навіть за наявності конденсату. Отже, датчик рівня повністю придатний для контролю рівня гартувальної рідини в колоні.



Рисунок 4.4 – Датчик рівня CLS-23N

Sensit PTK 320-120

Вимірювання здійснюється за температурою. Тип чутливого елемента — Pt 1000/3850. Виконання з комутаційною головкою. Діапазон вимірювання температури становить від -50 до +200 °С. Точність вимірювання відповідає технічному опису. Ступінь захисту — IP54. Клас точності — клас В. Максимально допустимий постійний струм — 1 мА. Корпус виготовлено з алюмінієвого сплаву. Стержень із чутливим елементом виготовлено з нержавіючої сталі марки DIN 1.4301, діаметр стержня становить 6 мм.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		43

Вимоги до температурного датчика:

1. Робочий діапазон вимірювання не менше $-20...+220$ °C.
2. Клас точності не нижче В відповідно до ІЕС 60751.
3. Сумісність із середовищем процесу (дихлоретан, пірогаз).
4. Вихід на основі термоперетворювача Pt1000.
5. Висока механічна та термічна стійкість.

Аналіз відповідності:

Sensit РТК 320-120 обладнаний сенсором Pt1000, який є промисловим стандартом для точного температурного вимірювання. Діапазон роботи від -50 до $+200$ °C охоплює всі температурні режими в гартувальній колоні та пароконденсатному тракті. Датчик має клас точності В, що є достатнім для стабільного регулювання. Захисний корпус із нержавіючої сталі забезпечує довготривалу експлуатацію в хімічно активному середовищі. Таким чином, цей датчик відповідає всім вимогам.



Рисунок 4.5 – Датчик температури Sensit РТК 320-120

Контролер Siemens 6ES7511-1СК01-0АВ0 S7-1500

Опис продукту: Siemens SIMATIC S7-1500 CPU 1511C-1 PN - це компактний центральний процесор, розроблений для використання в системах автоматизації. Він має робочу пам'ять обсягом 175 кБ для програм і 1 МБ для даних, що забезпечує достатньо місця для розробки та зберігання програмного забезпечення та даних. Робоча пам'ять програм: 175 кБ

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		44

Робоча пам'ять даних: 1 МБ

Дискретні входи: 16

Дискретні виходи: 16

Аналогові входи: 5

Аналогові виходи: 2

Високошвидкісні лічильники: 6

Інтерфейс: PROFINET IRT з 2-портовим комутатором

Продуктивність по бітах: 60 нс

Фронтальні з'єднувачі в комплекті

Потрібна картка пам'яті SIMATIC MC

Вимоги до ПЛК:

1. Підтримка аналогових та дискретних сигналів.
2. Можливість програмування ПД-регуляторів.
3. Реалізація логіки аварійної зупинки, сигналізації та обмежень.
4. Робота в реальному часі з високою швидкістю обробки.
5. Сумісність із промисловими інтерфейсами (PROFINET, HMI).

Аналіз відповідності:

Контролер Siemens S7-1500 є сучасною платформою для реалізації систем автоматичного керування. Він має достатню кількість аналогових і цифрових входів/виходів, підтримує програмування ПД-регуляторів на мові SCL, має вбудовані інтерфейси зв'язку, високу швидкість виконання команд та підтримку аварійного відключення. Це дозволяє реалізувати повноцінну логіку керування процесом очищення пірогазу відповідно до вимог надійності та безпеки.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		45



Рисунок 4.7 - Контролер Siemens SIMATIC S7-1500
SIMATIC S7-1500/ET 200MP

SIMATIC S7-1500, модуль аналогових входів AI 8 X U/I/RTD/TC, сигнали: струм/напруга/термоопір/термопари, розрішення 16 біт, точність 0.3 %, 8 каналів в групах по 8, напруга загального режиму при бл.10 В, діагностика, діагностичні тривожні повідомлення.

Вимоги до модуля розширення:

1. Сумісність з контроллером.
2. Достатня кількість аналогових входів.

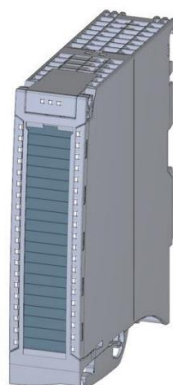


Рисунок 4.9 – модуль розширення 6ES7531-7KF00-0AB0 Siemens
3RT2015-1BB41

Виробник SIEMENS

Тип контактора 3-полюсний

Конфігурація контактів NO x3

Допоміжні інтегровані контакти NO

Напруга управління 24В DC

Струм робочий макс. 7А

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		46

Монтаж на панель, на шину DIN

Серія контактора 3RT20

Виводи гвинтові виводи

Робоча температура -25...60°C

Напруга ізоляції 690В

Розмір S00

Струм допоміжних контактів 10А



Рисунок 4.8 – Електромагнітний пускач 3RT2015-1BB41

Siemens 3SB3 201-0AA21

Тип кнопки: СТАРТ

Наявність фіксації: З самоповерненням

Кількість контактів кнопки / поста: 1 NO+1 NC

Наявність підсвітки в кнопці: Ні

Вимоги:

1NO + 1NC для запуску та зупинки

Зелений колір для функції "Пуск"

Механічна зносостійкість для частого натискання



Рисунок 4.10 – кнопка пуску

Siemens 3SB3 201-0AA21

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		47

Тип кнопки: СТОП

Наявність фіксації: 3 самоповерненням

Кількість контактів кнопки / поста: 1 NO+1 NC

Наявність підсвітки в кнопці: Ні

Вимоги:

1NO + 1NC для запуску та зупинки

Червоний колір для функції "Стоп"

Механічна зносостійкість для частого натискання



Рисунок 4.11 – кнопка стоп

4.3 Розробка додаткових проектних рішень

Схема зовнішніх підключень відображає структуру фізичного з'єднання польових пристроїв із шафою автоматизації, у складі якої розміщено програмований логічний контролер Siemens S7-1500 та допоміжне комутаційне обладнання. Схема побудована відповідно до вимог надійності, безпеки та зручності технічного обслуговування і забезпечує чітке розмежування між силовими, сигнальними та керувальними ланцюгами.

До складу зовнішніх підключень входять первинні вимірювальні прилади, виконавчі механізми, датчики сигналізації, а також з'єднання з мережами живлення. Всі сигнали заведено до клемних блоків, які розміщено у шафі керування. Таке рішення дозволяє легко виконувати монтаж, налагодження та обслуговування системи без втручання у внутрішню архітектуру ПЛК.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		48

Передбачено підключення аналогових датчиків із вихідним сигналом 4–20 мА. Зокрема, це датчики температури, тиску, рівня та витрати. Кабелі від датчиків заведено на відповідні клеми, звідки сигнали подаються на аналогові входи контролера. Усі аналогові кола мають гальванічну розв'язку та захист від перенапруги.

Окрему групу становлять виконавчі пристрої, що керуються аналоговим сигналом. До таких належать електропневматичні клапани.

Живлення системи реалізовано через окрему групу клем, до яких підключається джерело постійного струму напругою 24 В. Від цієї шини живляться усі активні елементи системи, включаючи модулі ПЛК, датчики та виконавчі механізми.

Схема зовнішніх підключень логічно пов'язана з функціональною схемою автоматизації і дозволяє реалізувати повний технологічний цикл контролю, регулювання та аварійного захисту процесу. Завдяки застосуванню стандартизованих сигналів, уніфікованих клемних блоків та чіткої структуризації підключень досягається висока надійність, гнучкість і зручність технічної реалізації системи.

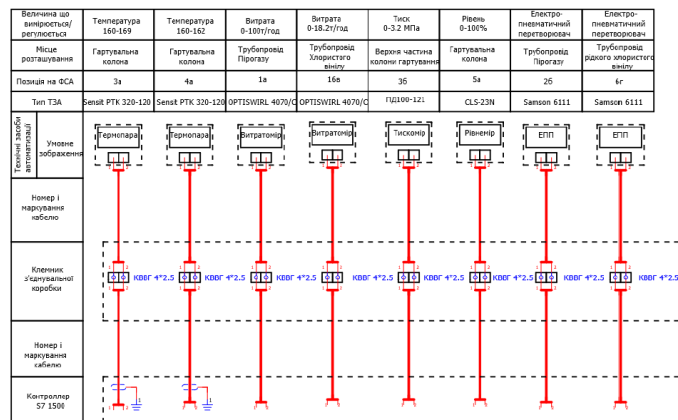


Рисунок 4.12 – Схема зовнішніх підключень

Опис схеми підключень до контролера Siemens S7-1500

Схема підключень відображає реалізацію автоматизованої системи керування процесом регулювання рівня гартувальної рідини в колоні гарячого гартування на базі програмованого логічного контролера Siemens S7-1500. У схемі представлені підключення датчиків, виконавчих механізмів, живлення та

модулів вводу/виводу, які забезпечують повноцінну роботу системи в реальному часі.

Для прийому аналогових сигналів від первинних перетворювачів використовуються канали аналогового вводу контролера. До них підключено датчики температури, тиску, рівня та витрати. Сигнали надходять у стандарті 4–20 мА, що дозволяє забезпечити високу точність вимірювання технологічних параметрів.

Датчики з'єднані через клемні ряди типу Х1–Х5. Зокрема, передбачено підключення витратоміра KROHNE OPTISWIRL 4070, датчиків температури типу Pt100, датчика рівня типу GLS-25N та датчика тиску ПД100-12.

Центральною обчислювальною одиницею є контролер Siemens CPU 1511C-1 PN, який виконує обробку даних, реалізує ПІД-алгоритм регулювання, формує керувальні сигнали та забезпечує логіку захисту і сигналізації. Для цього в складі системи передбачено окремий модуль цифрового вводу/виводу 6ES7511-1CK00-0AB0, який взаємодіє з дискретними сигналами технологічного обладнання.

Керування витратою гартувальної рідини здійснюється за допомогою електропневматичних регулюючих клапанів типу Samson 611.1. Подача керуючого сигналу на клапани відбувається з аналогових виходів контролера у вигляді струму 4–20 мА. Таким чином реалізується безперервне регулювання витрати в контурі стабілізації рівня.

Живлення всіх елементів системи автоматизації здійснюється від джерела постійного струму напругою 24 В. Ланцюги живлення та керування побудовані з дотриманням принципів гальванічної розв'язки та захисту від коротких замикань. Для зручності обслуговування та розширення системи передбачено резервні клеми на модулях вводу/виводу.

Схема підключень є структурованою, логічно завершеною та відповідає вимогам надійної експлуатації в умовах хімічного виробництва. Реалізовані рішення забезпечують гнучкість, точність та безпеку функціонування автоматизованої системи керування.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		50

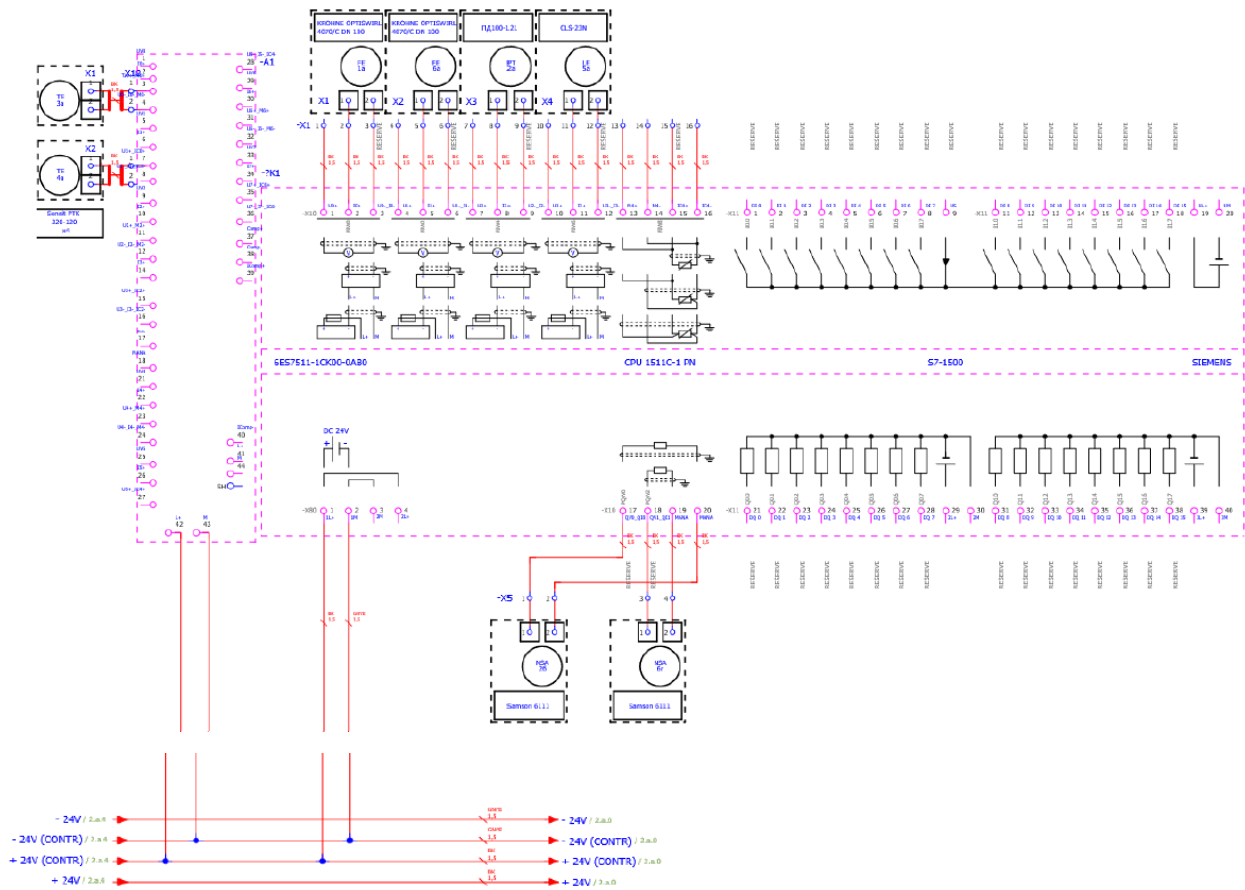


Рисунок 4.13 – Схема підключень до контролера

Щит керування призначений для розміщення всіх основних компонентів автоматизованої системи контролю та регулювання рівня гартувальної рідини в колоні гарячого гартування. Він є центральним елементом системи автоматизації, забезпечуючи обробку сигналів, формування керуючих впливів, організацію живлення і надання доступу до діагностики та обслуговування.

Конструктивно щит виконано у вигляді металевої шафи з дверима, що замикаються. У внутрішньому просторі щита встановлено монтажні рейки DIN для фіксації модулів автоматизації, клемних рядів, джерел живлення, комутаційних елементів та засобів захисту.

Основним елементом у складі щита є програмований логічний контролер Siemens S7-1500 з центральним процесором CPU 1511C-1 PN, який встановлений разом із модулями аналогових входів. Контролер здійснює збір сигналів від польових пристроїв, їх аналіз, реалізацію ПД-регулювання, формування керуючих дій.

									Арк.
									51
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ				

Для підключення зовнішніх кабелів у щиті розміщено ряд клемних блоків. Вони структуровані за видами сигналів: аналогові входи, аналогові виходи, дискретні входи, дискретні виходи та силове живлення. Такий підхід забезпечує зручність у монтажі, діагностиці та подальшому розширенні системи. Кожен клемний ряд промарковано відповідно до схеми зовнішніх підключень.

Джерело живлення постійного струму 24 В встановлено всередині щита і забезпечує електроживлення всіх компонентів системи. Живлення контролера, датчиків і виконавчих елементів організовано окремими групами з використанням захисних автоматів або плавких вставок.

Для запобігання виходу з ладу чутливих елементів передбачено використання модулів гальванічного розділення.

Загальна компоновка щита відповідає нормам технічної естетики, електробезпеки та ергономіки. Реалізовані конструктивні рішення забезпечують високу надійність, простоту обслуговування та можливість подальшої модернізації системи.

Щит є завершеним функціональним елементом автоматизованого комплексу і гарантує стабільну роботу технологічного процесу в умовах промислової експлуатації.

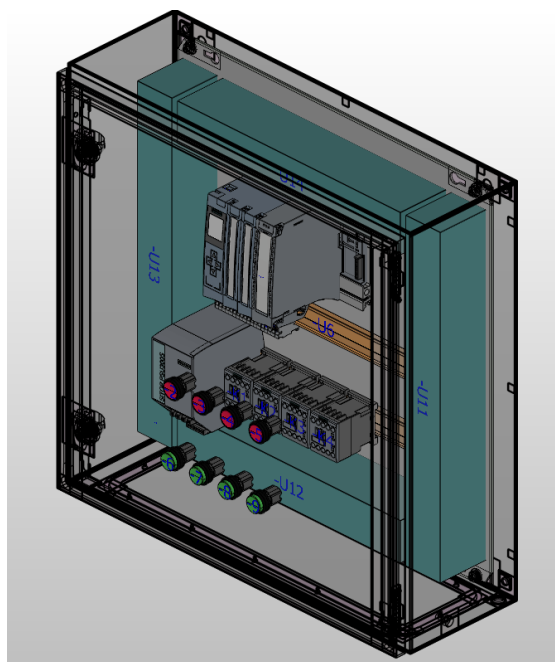


Рисунок 4.14 – Зображення щита керування

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		52

4.4 Розробка програмного забезпечення для PLC

Мета даного проєкту — розробити програмне забезпечення засобами CODESYS мовою SCL для реалізації автоматичного регулювання витрати охолоджувальної рідини в колоні гарячого гартування. Програма повинна підтримувати стабільний рівень охолоджувальної рідини в заданих межах, враховуючи вплив температури в нижній та верхній частинах колони, а також внутрішнього тиску. Для цього необхідно реалізувати функціональний блок ПІД-регулятора, який на основі вхідних параметрів обчислює керуючий вплив на витрату. Регулятор повинен забезпечувати стандартні складові ПІД-алгоритму: пропорційну, інтегральну та диференціальну. Також система має містити механізми аварійного захисту: у випадку перевищення критичних температур, тиску або відхилення рівня від допустимого діапазону регулятор повинен примусово зупинитись і встановлювати витрату на нуль. Крім того, передбачити сигналізацію при досягненні попереджувальних меж, що не вимагають зупинки, але свідчать про потенційну небезпеку. Результатом роботи має стати керуючий сигнал, що адаптується під зміну процесу, підтримує рівень у межах цільового значення, реагує на зовнішні збурення та забезпечує стабільність системи.

Весь алгоритм реалізується у вигляді функціонального блоку з чітко визначеними входами та виходами, який викликається у головній програмі циклічно з використанням актуальних даних процесу.

PLC_PRG

```
1 PROGRAM PLC_PRG
2 VAR
3   pidController : FB_PID_ColumnControl;
4   level         : REAL := 60.0;
5   tempTop       : REAL := 170.0;
6   tempBottom    : REAL := 160.0;
7   press         : REAL := 2.5;
8   dt_val        : REAL := 0.1;
9   enable        : BOOL := TRUE;
10  flowOutput     : REAL;
11  alarmStatus    : BOOL;
12  emergency      : BOOL;
13 END_VAR
14
15
16
17
18
```

Рисунок 4.15 – Вікно програми в вкладці Dedication

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		53

У програмі PLC_PRG реалізовано управління витратою охолоджувальної рідини в колоні гарячого гартування за допомогою ПІД-регулятора, представленого у вигляді функціонального блоку FB_PID_ColumnControl. Вхідними параметрами до регулятора є поточний рівень у колоні Level, температури у верхній і нижній частинах Temp_Top і Temp_Bottom, тиск Press, а також інтервал дискретизації dt_val і логічний сигнал Enable, що дозволяє або забороняє роботу регулятора. На виході блок формує значення Setpoint_Flow, яке відповідає керуючому впливу на витрату, та сигнали Alarm і EmergencyStop, що інформують про аварійну ситуацію або критичний стан процесу.

У тілі функціонального блоку спочатку виконується перевірка на критичні умови. Якщо температура перевищує 220 °С або тиск вище 3.2 бар, або рівень виходить за межі від 40 до 80 %, спрацьовує аварійна зупинка: встановлюється EmergencyStop, активується сигнал Alarm, а витрата скидається до нуля.

У менш критичних випадках, коли температура перевищує 180 °С або тиск перевищує 2.8 бар, вмикається лише сигнал тривоги без зупинки регулятора.

Далі, якщо дозволено виконання (Enable = TRUE), виконується ПІД-регулювання. Визначається похибка між заданим і фактичним рівнем, обчислюються пропорційна, інтегральна і диференційна складові за заданими коефіцієнтами, після чого формується сумарний керуючий сигнал u. З метою адаптації до зовнішніх умов значення u коригується.

Якщо температура або тиск перевищують граничні значення, керування зменшується на 10 %, а якщо розраховане значення виходить за межі допустимого діапазону (вище 18.2 або нижче 7.2), воно додатково масштабується для стабілізації процесу. У випадку вимкнення регулятора (Enable = FALSE) керуючий сигнал скидається, а внутрішні стани інтегратора та попередньої похибки обнуляються.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		56

Таким чином, реалізована система автоматичного регулювання забезпечує підтримання заданого рівня в колоні з урахуванням обмежень по температурі та тиску, включаючи захист від аварійних ситуацій і адаптацію до змін умов процесу.

Висновки до розділу

У цьому розділі виконано підбір сучасних засобів автоматизації для реалізації системи регулювання. Вибрано надійні промислові компоненти: датчики тиску, температури, рівня, витрати, електропневматичні перетворювачі, а також контролер Siemens S7-1500. Розроблено функціональну та електричну схеми автоматизації, які враховують усі аспекти підключення, сигналізації, захисту та інтерфейсного обміну з оператором. Особливу увагу приділено реалізації системи в умовах реального виробництва, що підвищує надійність і безпечність функціонування об'єкта. Програмне забезпечення на мові SCL виконує стабільне регулювання з урахуванням аварійних умов та забезпечує адаптацію до змін технологічних параметрів.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		57

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи повністю розроблено автоматизовану систему керування процесом очищення пірогазу від твердих домішок у гартувальній колоні С-001, що є важливим елементом технологічного циклу виробництва хлористого вінілу. Проєкт охопив усі етапи інженерного проєктування – від глибокого аналізу об'єкта керування до моделювання динаміки процесу, синтезу регулятора та розробки програмного забезпечення.

Аналіз технологічного процесу показав, що основною метою гартувальної колони є ефективне очищення гарячого пірогазу за допомогою гартувальної рідини — дихлоретану. Детально досліджено схему подачі, циркуляції та відведення рідини, виділено критичні параметри (температура, тиск, рівень), порушення яких призводить до аварійного стану. Установлено, що саме рівень гартувальної рідини є ключовим параметром для забезпечення стабільної та якісної роботи процесу.

Технологічна схема автоматизації, розроблена в рамках проєкту, демонструє раціональний підхід до побудови системи контролю з урахуванням особливостей об'єкта: розподілу потоків, розпилення рідини, охолодження та конденсації. Виділено основні точки контролю, обґрунтовано їх вибір і взаємодію в межах системи.

Математичне моделювання гартувальної колони дозволило описати її динамічні властивості як аперіодичної ланки другого порядку. У процесі побудови моделі визначено основні характеристики об'єкта керування: коефіцієнт підсилення, постійну часу та залежності між витратою рідини й рівнем. На основі отриманого диференціального рівняння виведено передатну функцію, яка надалі використана для моделювання автоматичної системи регулювання.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		58

Синтез автоматичної системи керування показав доцільність застосування класичної одноконтурної системи зі зворотним зв'язком на базі ПІД-регулятора. Така структура забезпечує високу точність, стабільність та простоту реалізації.

Параметри регулятора (K_p , T_i , T_d) були підібрані на основі комп'ютерного моделювання в середовищі Matlab/Simulink. Встановлено, що отриманий перехідний процес характеризується відсутністю статичної похибки, малим перерегулюванням ($\leq 4\%$) і добрим демпфуванням, що підтверджує правильність налаштувань.

Стійкість системи була перевірена двома незалежними методами: аналітично через характеристичне рівняння та за допомогою графічного критерію Михайлова.

Вибір технічних засобів автоматизації проводився з урахуванням вимог до точності, швидкодії, сумісності з ПЛК та умов експлуатації (температура, тиск, вибухозахист). До системи автоматизації включено витратоміри, датчики рівня, тиску, температури, електропневматичні перетворювачі та контролер Siemens S7-1500. Усі компоненти інтегровані у функціональну схему автоматизації, що забезпечує надійний контроль і керування процесом.

Функціональна та принципова електрична схеми були розроблені з урахуванням усіх вимог до безпечної експлуатації, в тому числі — аварійної сигналізації, гальванічної розв'язки, ручного/автоматичного режиму, живлення системи та комутації з виконавчими механізмами.

Програмне забезпечення, реалізоване на мові SCL у середовищі, відповідає всім функціональним вимогам: стабілізація рівня, реакція на відхилення, обробка аварійних подій, обмеження витрати, вивід сигналів на панель оператора. Структура коду оформлена у вигляді функціонального блоку FB_PID_ColumnControl, що дозволяє легко масштабувати й модифікувати систему в майбутньому.

Результати бакалаврської роботи повністю відповідають поставленій меті — розробити сучасну, стійку та ефективну автоматичну систему керування процесом гарячого гартування пірогазу.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		59

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з навчальної дисципліни «Автоматизація технологічних процесів і виробництва» для спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Калуш, 2021-40с.
2. Методичні вказівки до виконання розрахунків регулюючих органів (для студентів спеціальності 151) Калуш, 2020-20с.
3. Прокопенко, І. В. Моделювання автоматизованих систем керування в MATLAB/Simulink: навчальний посібник. — К.: НАУ, 2020. — 210 с.
4. Siemens AG. SIMATIC S7-1500 Automation System. System Manual. — Siemens Official Documentation, 2022. [Електронний мануал] — URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/792/59191792/att_895925/v4/s71500_et200mp_system_manual_en-US_en-US.pdf
5. Lawrence, N. P., Stewart, G. E., Loewen, P. D., et al. Optimal PID and Antiwindup Control Design as a Reinforcement Learning Problem. *arXiv preprint*, 2020. [Електронний посібник] — URL: https://dais.chbe.ubc.ca/assets/preprints/IFAC_PID_RL_2020-7.pdf
6. Горбатюк В. І. Системи автоматичного керування: навч. посіб. — Київ: Ліра-К, 2021. [Електронний посібник] — URL: http://dSPACE.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/20539/1/Gorbatiuk_SAK.pdf
7. Білецький В. С. Основи автоматизації технологічних процесів: Підручник. — Донецьк: НТШ, 2020.

					БР.АКП-61.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		60

ДОДАТКИ

Перш. застосує.

Справ. №

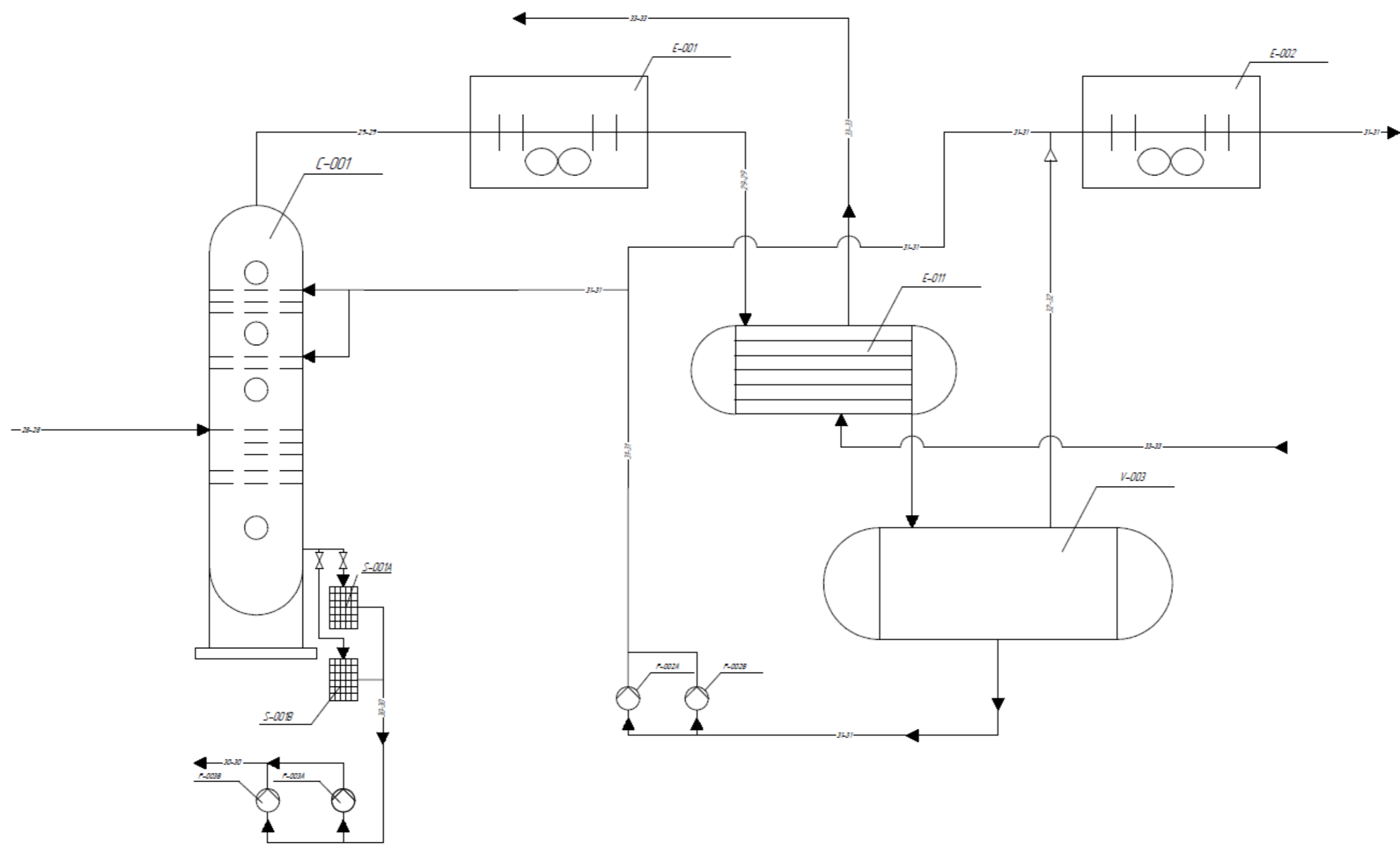
Підп. і дата

Інв. № дудл.

Взам. инв. №

Підп. і дата

Інв. № доставір.



C-1501 – Гартувальна колона; $\phi=1.8\text{м}$, E-1501, E-1502 –
 Повітряний холодильник; $\phi=2.8\text{м}$, S-1501A,B –
 Фільтри; P-1503A,B – Насоси відцентрові; P-1502A,B –
 Насоси відцентрові; E-1512 – Холодильник; V-1503 –
 Розділювальна ємність; $\phi=6\text{м}$.

					БР.АКП-61.00.00.001		
					Технологічна схема		
					Букв.	Масштаб	Масштаб
							1:1
					Арк. 1	Аркушів	6
					ІФНТУНГ		
					Гр. АКП-23-2К		
					Формат А3		

Змін.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Сімків М.І.			
Перевір.	Фешанич Л.І.			
Т.контр.				
Реценз.	Барин В.С.			
Н.контр.	Кучмистенко О.В.			
Затверд.	Лагойда А.І.			

Копіював

Перш. застосує.

Справ. №

Підп. і дата

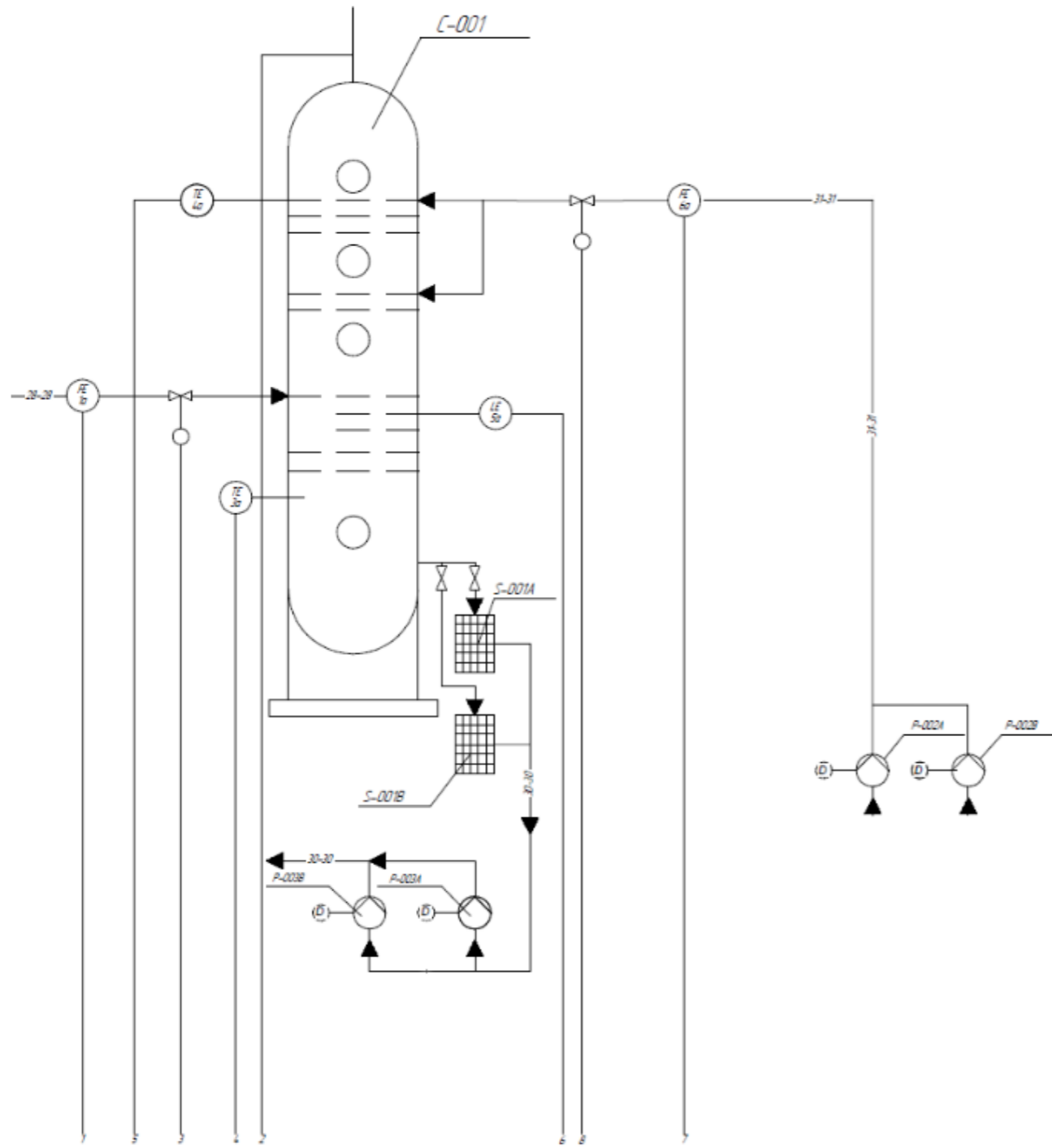
Інв. № дудл.

Взам. инв. №

Підп. і дата

Інв. № доставл.

БР.АКП-61.00.00.002



1 0-20 м/год
 2 0-3.2 МПа
 3 160-169°C
 4 160-162°C
 5 0-100%
 6 0-18.2 м/год
 7
 8
 9
 10
 11
 12

Прилад по місці	PI 18	PI 28				LI 38	PI 39		NI 9a	NI 10a	NI 11a	NI 12a
Перетворювач			PI 29	TI 38	TI 42		TI 43					
Гальванічне розділення	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Контроль	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Регулювання	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Автоматичний захист	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Сигналізація	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Вивід на дисплей/принтер	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

				БР.АКП-61.00.00.002		
				Функціональна схема		
				Букв.	Масштаб	Масштаб
						1:1
Змін. Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Розроб.	Сімків М.І.					
Перевір.	Фешанич Л.І.					
Т.контр.						
Реценз.	Барин В.С.					
Н.контр.	Кучмистенко О.В.					
Затверд.	Лагойда А.І.					
				Арк. 2	Аркушів	6
				ІФНТУНГ		
				Гр. АКП-23-2К		
				Формат А3		

Копіював

БР.АКП-61.00.00.003

Перш. застосув.

Призначення	Назва матеріального потоку
28-28	Трубопровід пірогазу
29-29	Трубопровід пароконденсату
30-30	Трубопровід кубового залишку
31-31	Трубопровід рідкого хлористого вінілу

Справ. №

Позначення	Назва, технічна характеристика	К-ть	Примітка
C-1501	Гартувальна колона; $\phi=1.8\text{м}$	1	H=10.5м
S-1501A,B	Фільтри;	2	
P-1503A,B	Насоси відцентрові;	2	
P-1502A,B	Насоси відцентрові;	2	

Підп. і дата

Позиція	Призначення пристрою	Тип	К-ть	Примітка
1б,6в	Вимірювання витрати	OPTISWIRL 4070/C	2	Вихровий
2б,6з	Електро-пневматичний перетворювач	Samson 6111	2	
2а	Вимірювання тиску	ПД100-121	1	
3а,4а	Вимірювання температури	Sensit PTK 320-120	4	
5б	Вимірювання рівня	CLS-23N	1	
9а,10а,11а,12а	Керування приводом	3RT2015-1BB41	4	
	Контроль і регулювання параметрів	S7 1500	1	
	Модуль розширення	S7-1500/ET 200MP	1	

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

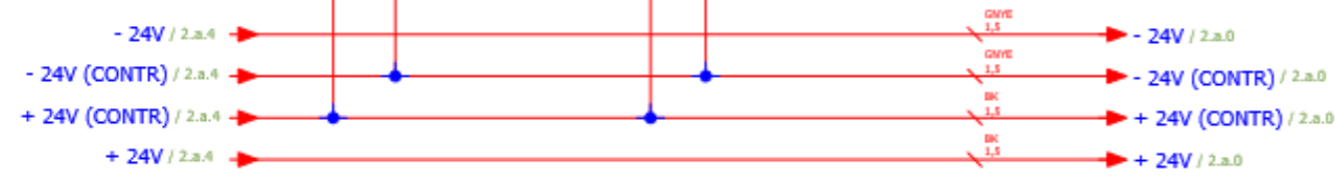
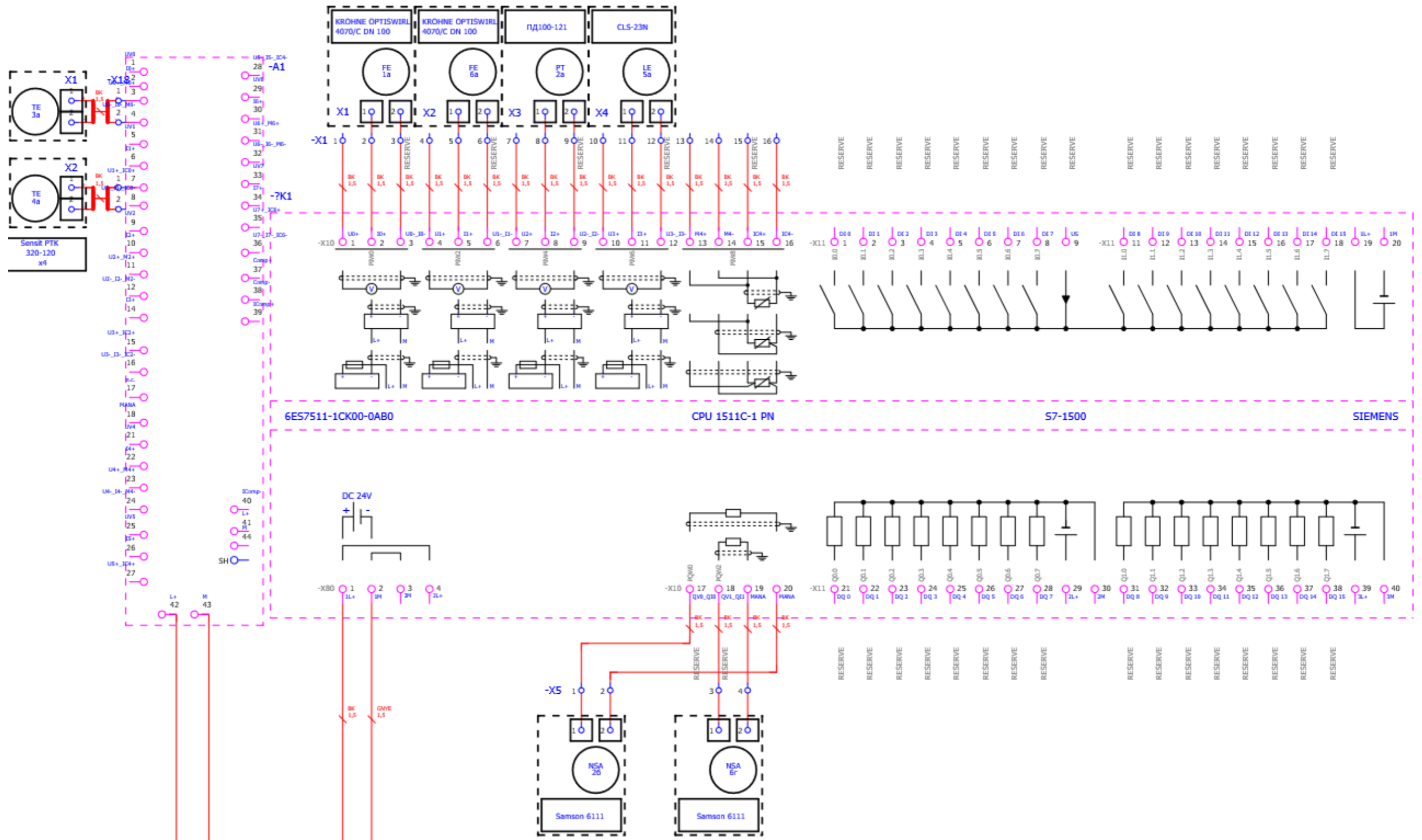
Підп. і дата

БР.АКП-61.00.00.003

Інв. № достовір.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Перелік позначень і приладів	Букв.	Масса	Масштаб
Розроб.		Сімків М.І.				Арк. 3	Аркушів 6	
Перевір.		Фешанич Л.І.				ІФНТУНГ		
Т.контр.						Гр. АКП-23-2К		
Реценз.		Барин В.С.				Формат А4		
Н.контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

Копіював



Змін. Арк.	№ док.м.	Підп.	Дата
Розроб.	Сімків М.І.		
Перевір.	Фешанич Л.І.		
Т.контр.			
Реценз.	Барин В.С.		
Н.контр.	Кучмистенко О.В.		
Затверд.	Лагойда А.І.		

БР.АКП-61.00.00.004

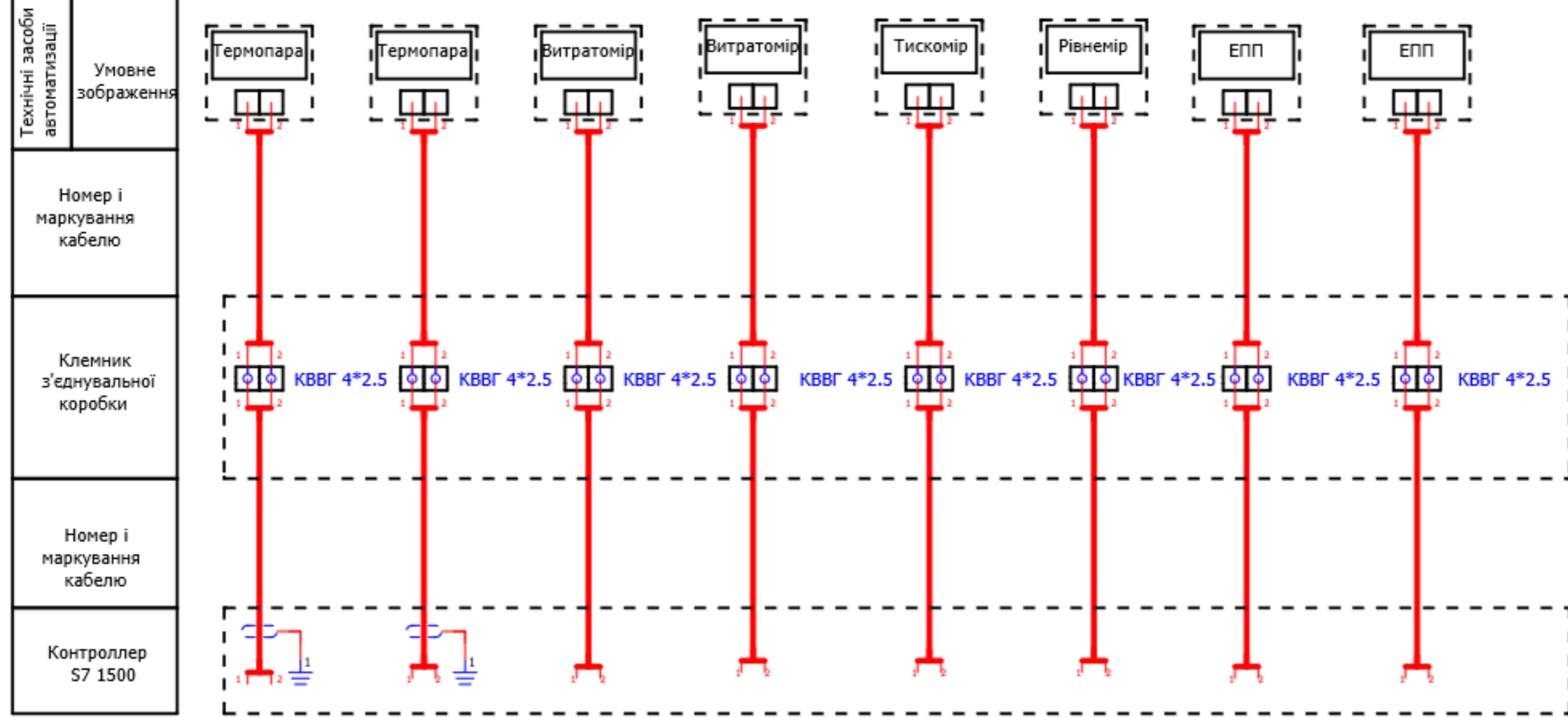
Схема підключень

Букв.	Масштаб
	1:1

Арк. 4 Аркушів 6

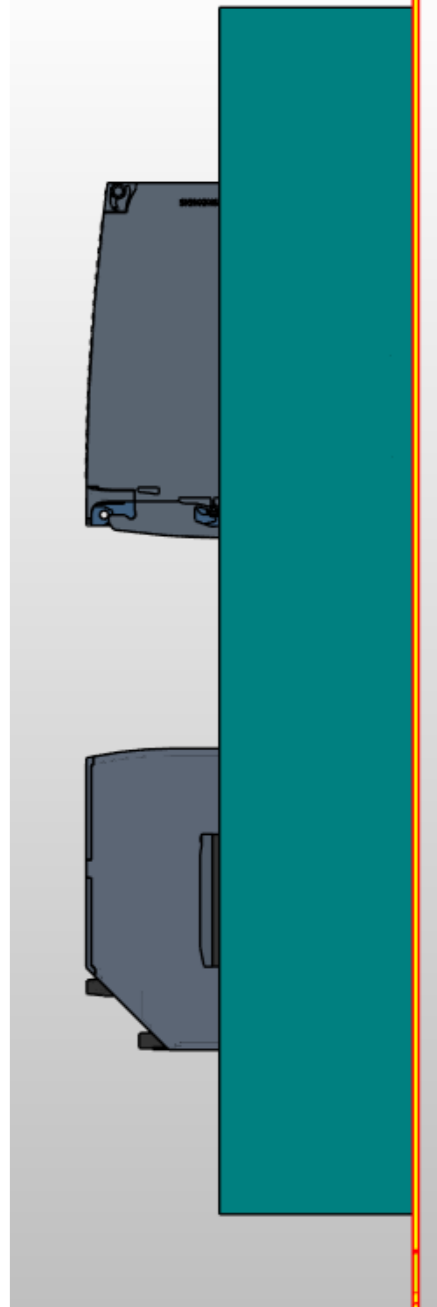
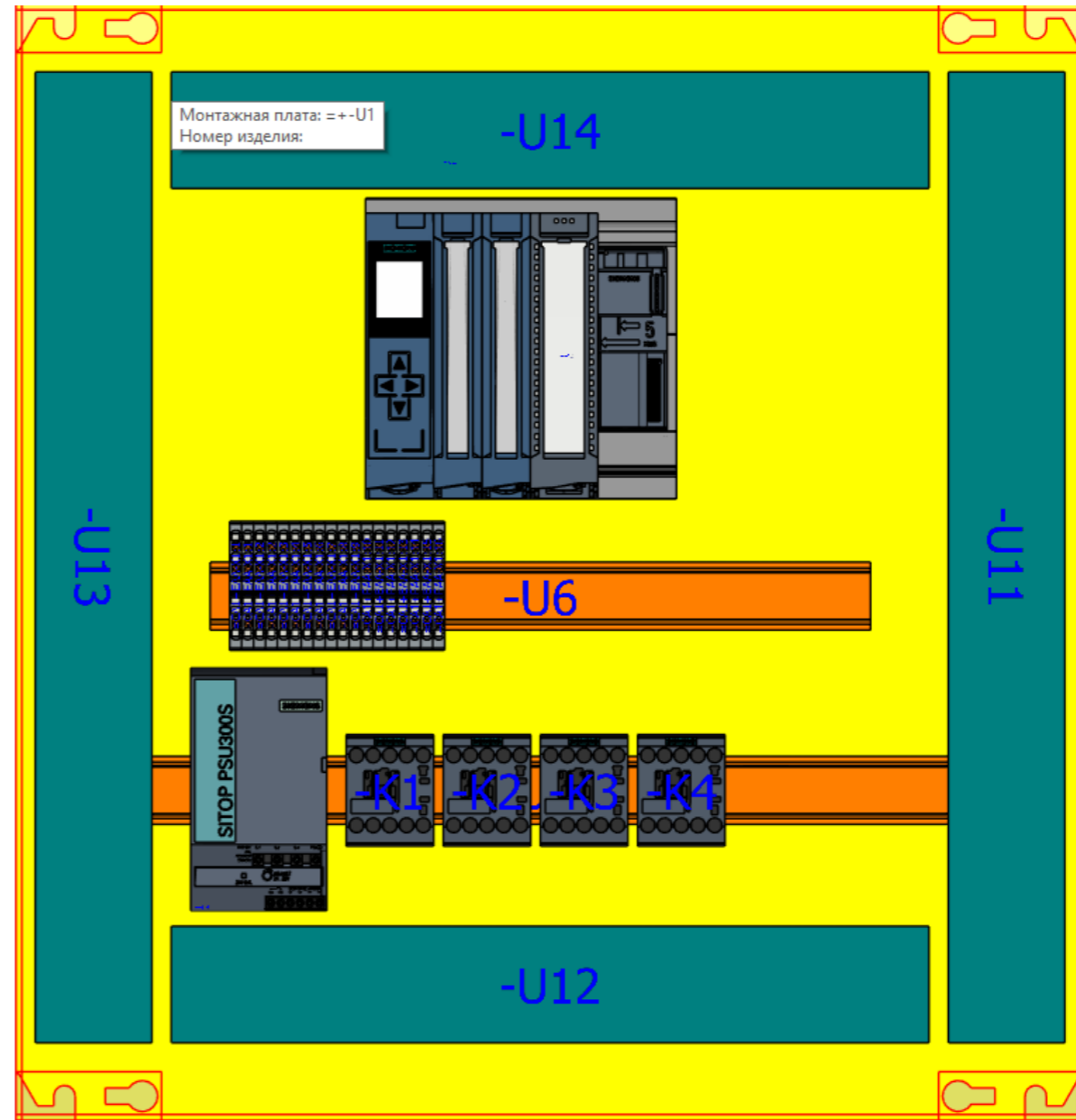
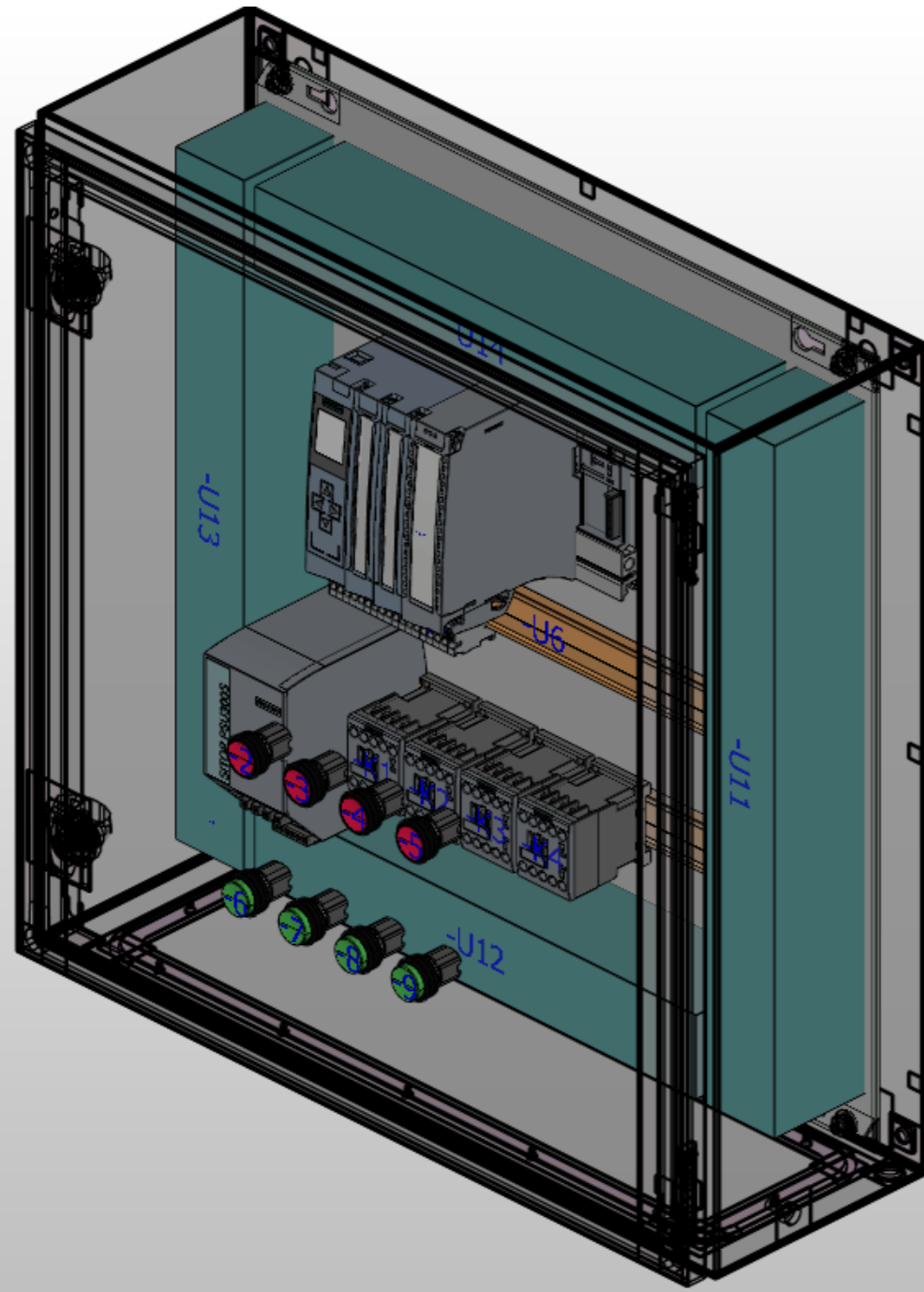
ІФНТУНГ
Гр. АКП-23-2К
Формат А3

Величина що вимірюється/регулюється	Температура 160-169	Температура 160-162	Витрата 0-100т/год	Витрата 0-18.2т/год	Тиск 0-3.2 МПа	Рівень 0-100%	Електропневматичний перетворювач	Електропневматичний перетворювач
Місце розташування	Гартувальна колона	Гартувальна колона	Трубопровід Пірогазу	Трубопровід Хлористого вінілу	Верхня частина колони гартування	Гартувальна колона	Трубопровід Пірогазу	Трубопровід рідкого хлористого вінілу
Позиція на ФСА	3а	4а	1а	16в	3б	5а	2б	6г
Тип ТЗА	Sensit PTK 320-120	Sensit PTK 320-120	OPTISWIRL 4070/C	OPTISWIRL 4070/C	ПД100-121	CLS-23N	Samson 6111	Samson 6111



				БР.АКП-61.00.00.005		
Змін. Арк.	№ док.м.	Підп.	Дата	Схема зовнішніх з'єднань	Букв.	Масштаб
Розроб.	Сімків М.І.					1:1
Перевір.	Фешанич Л.І.					
Т.контр.					Арк. 5	Аркушів 6
Реценз.	Барин В.С.				ІФНТУНГ	
Н.контр.	Кучмистенко О.В.			Гр. АКП-23-2К		
Затверд.	Лагойда А.І.			Формат А3		

БР.АКП-61.00.00.006



Перш. застосує.

Справ. №

Підп. і дата

Інв. № дудл.

Взам. инв. №

Підп. і дата

Інв. № доставір.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Сімків М.І.			
Перевір.	Фешанич Л.І.			
Т.контр.				
Реценз.	Барин В.С.			
Н.контр.	Кучмистенко О.В.			
Затверд.	Лагойда А.І.			

БР.АКП-61.00.00.006

Щит керування

Букв.	Масса	Масштаб
		1:1
Арк. 6	Аркушів 6	

ІФНТУНГ
Гр. АКП-23-2К
Формат А3

Копіював