

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКП -45.00.00.000 ПЗ

група АКП -23-1К

**Святослав Іваник**

**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

Іваник Святослав Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53  
(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розробка системи автоматизованого керування резервуарами для

(назва роботи)

зберігання нафти

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 І.І. Чигур  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-1К С.В. Іваник  
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

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

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

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



## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу зберігання нафти, як об'єкта автоматизації.	13.05.2025 р.	
2	Ідентифікація об'єкта керування та синтез системи автоматизованого керування рівнем в резервуарах, що працюють у парі.	11.05.2025 р.	
3	Синтез автономної системи автоматичного регулювання.	23.05.2025 р.	
4	Розробка проектної складової САК резервуарами для зберігання нафти	11.06.2025 р.	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

С.В. Іваник \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

О.В. Кучмистенко \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 86 сторінок друкованого тексту, 22 рисунків, 3 таблиці, 15 посилання на джерела.

Тема: «Розробка системи автоматизованого керування резервуарами для зберігання нафти»

Об'єкт дослідження: резервуарний парк, призначений для накопичення, обліку та контролю стану нафтопродуктів.

Мета проекту: підвищення точності та ефективності технологічного обліку й керування процесами зберігання та переміщення нафти шляхом впровадження автоматизованої системи з використанням сучасних програмованих логічних контролерів, а також забезпечення пожежної безпеки та дистанційного моніторингу параметрів середовища.

Методи дослідження: математичне моделювання динаміки рівня у взаємопов'язаних ємностях на основі рівнянь матеріального балансу, лінеаризація моделей, аналітичний синтез ПІ-регуляторів методом розміщення коренів, експериментальне апроксимування характеристик регулюючих органів, програмна реалізація керувальних алгоритмів у середовищі MATLAB/Simulink.

Результати бакалаврської роботи: виконано обґрунтований вибір технічних засобів автоматизації для контролю рівня, тиску, витрати і температури в резервуарах, здійснено побудову математичної моделі гідравлічного об'єкта, проведено її лінеаризацію та параметризацію. Розроблено структуру автономної системи керування з незалежними контурами регулювання, виконано синтез ПІ-регуляторів та перевірку стійкості за критерієм Рауса–Гурвіца. Змодельовано перехідні процеси та оцінено якість регулювання. Розроблено ієрархічну трирівневу архітектуру автоматизації резервуарного парку, створено SCADA-інтерфейс для моніторингу, управління та візуалізації.

Ключові слова: резервуарний парк, автоматизація, SCADA, ПІ-регулятор, рівень, нафта.

## ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 86 pages of printed text, 22 figures, 3 tables, and 15 references.

Topic: "Development of an Automated Control System for Oil Storage Tanks"

Object of study: a tank farm intended for accumulation, accounting, and condition monitoring of oil products.

Project objective: to improve the accuracy and efficiency of technological accounting and control of storage and transfer processes of oil by implementing an automated system based on modern programmable logic controllers, while also ensuring fire safety and remote monitoring of environmental parameters.

Research methods: mathematical modeling of level dynamics in interconnected tanks based on mass balance equations, model linearization, analytical synthesis of PI controllers using the pole placement method, experimental approximation of control valve characteristics, and software implementation of control algorithms in MATLAB/Simulink environment.

Results of the bachelor's thesis: a substantiated selection of automation equipment for monitoring level, pressure, flow rate, and temperature in tanks was performed. A mathematical model of the hydraulic object was developed, followed by its linearization and parameterization. The structure of an autonomous control system with independent control loops was designed, PI controllers were synthesized, and system stability was verified using the Routh–Hurwitz criterion. Transient responses were simulated and control quality was evaluated. A hierarchical three-level automation architecture for the tank farm was developed, along with a SCADA interface for monitoring, control, and visualization.

Keywords: tank farm, automation, SCADA, PI controller, level, oil.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>9</b>
<b>1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ, ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Технологічні особливості зберігання нафти в резервуарних парках України .....	11
1.2 Призначення резервуарного парку .....	13
1.3 Резервуарний парк .....	15
1.4 Конструкції та обладнання резервуарів .....	19
1.5 Резервуарний парк як об’єкт управління .....	20
1.6 Визначення маси нафти у заходах місткості .....	22
Висновки до розділу .....	26
<b>2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЕМ В РЕЗЕРВУАРАХ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У ПАРІ.....</b>	<b>28</b>
2.1 Опис процесу та ідентифікація об’єкту керування .....	28
2.1 Формування завдання для синтезу АСК .....	30
2.2 Математична модель технологічного об’єкта .....	33
2.3 Лінеаризована математична модель технологічного об’єкта .....	35
2.3 Обчислення параметрів нелінійної математичної моделі .....	36
2.4 Апроксимація статичної характеристики регулюючого органу.....	37
Висновки до розділу .....	38
<b>3 СИНТЕЗ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....</b>	<b>40</b>
3.1 Процедура розробки система автоматичного керування .....	40
3.2. Визначення параметрів налаштування регуляторів.....	47
3.3 Розрахунок параметрів налаштування регуляторів .....	53

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Іваник С.В.			Розробка системи автоматизованого керування резервуарами для зберігання нафти	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Кучмистенко О.В.				Д	6	
Реценз.		Чигур І.І.				АКП-23-1К ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

3.4 Оцінка стійкості автономної системи автоматичного керування.....	53
3.5 Оцінка якості процесу керування.....	55
Висновки до розділу .....	58
<b>4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК РЕЗЕРВУАРАМИ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ.....</b>	<b>60</b>
4.1 Дослідження ієрархії системи контролю і керування.....	60
4.3 Розробка SCADA-системи для резервуарного парку.....	76
4.4 Проектування схеми зовнішніх з'єднань та загального вигляду щита .....	78
Висновки до розділу .....	80
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>81</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА .....</b>	<b>85</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>86</b>

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ДУ – діаметр умовний;

МВ – модуль введення/виведення;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПЛК – програмований логічний контролер;

РП – резервуарний парк;

ШУ – щит управління.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетичного сектору ефективно функціонування інфраструктури зберігання вуглеводневої сировини має вирішальне значення для забезпечення безперервного постачання нафти та її переробки. Зростаючий обсяг видобутку нафти, посилення вимог до екологічної безпеки, необхідність зниження операційних витрат, а також підвищення надійності та адаптивності виробничих процесів формують об'єктивну потребу в запровадженні новітніх підходів до керування резервуарними парками. У цьому контексті особливого значення набуває створення автоматизованих систем, які здатні забезпечувати високоточний контроль технологічних параметрів з дотриманням нормативних вимог і стандартів промислової безпеки.

Процеси, пов'язані зі зберіганням нафти, відзначаються складністю динамічної поведінки та потребують врахування значної кількості змінних, що постійно змінюються в часі. До таких змінних належать об'єм і рівень рідини в резервуарах, тиск парів, температурні коливання, а також параметри, що визначають стан запірно-регулюючої арматури та насосного обладнання. Відсутність ефективного управління цими параметрами може призвести не лише до технологічних відхилень, а й до створення небезпечних ситуацій, що мають потенційно катастрофічні наслідки як для техногенного середовища, так і для екології в цілому.

В умовах інтенсивної цифровізації промисловості розробка автоматизованої системи керування резервуарами стає необхідною для досягнення високого рівня інтеграції між об'єктами зберігання, системами диспетчеризації та модулями моніторингу. Завдяки впровадженню інтелектуальних алгоритмів керування та адаптивних засобів регулювання вдається забезпечити оптимізацію режимів експлуатації резервуарів з урахуванням змін зовнішнього середовища, сезонних коливань, а також особливостей логістичного навантаження.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Актуальність теми дослідження зумовлена потребою у створенні математичних моделей, здатних адекватно описати динаміку процесів зберігання нафти, а також у впровадженні програмних і апаратних засобів, які б дозволяли здійснювати регулювання параметрів у реальному часі. Розробка такої системи передбачає міждисциплінарний підхід, що поєднує принципи теорії автоматичного керування, методи обробки інформаційних сигналів, елементи гідравліки та термодинаміки, а також технології промислової автоматизації та зв'язку.

Таким чином, створення ефективної автоматизованої системи керування резервуарним господарством виступає одним із засобів підвищення технологічної стійкості нафтозберігаючих об'єктів, сприяє мінімізації втрат і забезпечує належний рівень безпеки. Успішна реалізація такої системи потребує глибокого аналізу об'єкта керування, побудови адекватної моделі, обґрунтування вибору структури системи автоматизації, а також розробки програмного забезпечення, що забезпечує надійний і гнучкий контроль за станом процесу.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 1.1 Технологічні особливості зберігання нафти в резервуарних парках України

Процес зберігання нафти в резервуарних парках становить складну сукупність технічних, фізико-хімічних і логістичних процесів, які інтегруються в єдину систему для забезпечення безпечного та безперервного функціонування нафтотранспортної і нафтопереробної інфраструктури. Зберігання нафти не обмежується виключно накопиченням вуглеводневої сировини; воно передбачає контроль за її фізичним станом, дотримання термодинамічних умов, а також забезпечення оперативного доступу до сировини для її подальшого транспортування або переробки. Резервуарні парки, як промислові об'єкти тривалого циклу, виступають центральним елементом системи стратегічного управління нафтовими ресурсами держави.

У структурі резервуарного парку реалізовано складну технологічну схему, яка передбачає взаємодію між системами зберігання, перекачування, вимірювання, дегазації, а також засобами контролю за температурним режимом і динамікою тиску. Нафта, як речовина з високою хімічною активністю, вимагає дотримання умов, що запобігають її деградації під дією температурних коливань, контакту з киснем, надмірного тиску парів або попадання вологи. Тому конструкція резервуарів проектується з урахуванням герметичності, термостійкості, а також можливості відведення легколетких фракцій. У більшості випадків використовуються сталеві резервуари вертикального типу з плаваючим дахом або стаціонарним покриттям, які дозволяють мінімізувати втрати нафти через випаровування.

Особливого значення набуває контроль за рівнем нафтопродукту, температурою, тиском і швидкістю наповнення, що забезпечується за допомогою автоматизованих систем вимірювання. На сучасних об'єктах

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

застосовуються ємнісні, ультразвукові або радарні рівнеміри, а також термопари або терморезистори для температурного моніторингу. Для збереження стабільності властивостей нафти в умовах низьких температур упроваджуються системи підігріву, зокрема за рахунок циркуляції теплоносія в середині резервуара або зовнішнього електронагрівального обладнання.

В Україні резервуарні парки становлять невід'ємну частину національної нафтотранспортної системи, яка об'єднує магістральні трубопроводи, нафтопереробні підприємства, перевалочні термінали та логістичні вузли. Їхнє функціонування має стратегічне значення з погляду енергетичної безпеки та формування національного резерву паливно-енергетичних ресурсів. Історично система резервуарного зберігання в Україні формувалася у тісному взаємозв'язку з потребами нафтопереробної галузі, включаючи такі підприємства, як Кременчуцький, Дрогобицький, Надвірнянський та Лисичанський НПЗ. Після часткового зменшення обсягів внутрішньої переробки акцент був зміщений у бік функцій транзиту, перевалки та зберігання імпортованої сировини.

Станом на сьогодні, технічна модернізація резервуарних парків в Україні є одним із напрямів реформування нафтогазової галузі. Значна частина об'єктів побудована в другій половині ХХ століття та потребує оновлення з урахуванням сучасних вимог до екологічної безпеки, точності вимірювань та автоматизації процесів. У межах цього процесу впроваджуються нові конструкційні матеріали, антикорозійні покриття, системи автоматизованого керування технологічними процесами, а також програмно-апаратні комплекси для дистанційного моніторингу й діагностики стану резервуарів.

Важливу роль у функціонуванні таких об'єктів відіграють нормативні документи, що регулюють проектування, будівництво, експлуатацію та технічне обслуговування резервуарних споруд. В Україні зберігає чинність низка стандартів, адаптованих до міжнародних норм, зокрема у частині протипожежного захисту, захисту від витоків, а також вимог до метрологічного

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

забезпечення вимірювальних систем.

## 1.2 Призначення резервуарного парку

Резервуарні парки становлять невід’ємну частину інфраструктури нафтових складів, у межах якої реалізується технологічний цикл приймання, накопичення, зберігання та видачі нафти. Ці об’єкти репрезентують комплексну систему, що включає мережу резервуарів, з’єднану трубопроводами та обладнану допоміжними технічними засобами, які забезпечують безперервну циркуляцію та контроль за станом вуглеводневої сировини. Завдяки інтеграції в транспортно-технологічну мережу, резервуарні парки виконують функції буферного регулювання потоку нафти між різними ланками логістичного ланцюга – від первинного добування до споживання або подальшої переробки (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Резервуарний парк

На об’єктах великої пропускної здатності, зокрема на територіях магістральних нафтопроводів, головних або проміжних станцій, резервуарні

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

парки функціонують у безперервному режимі. Вони покликані підтримувати рівновагу між надходженням і відпуском сировини, компенсуючи сезонні коливання в попиті та забезпечуючи стабілізацію навантаження на трубопровідні системи. Також важливою є їхня роль у створенні стратегічних резервів, що можуть бути використані в умовах надзвичайних ситуацій або для підтримання безперервності енергозабезпечення в періоди пікового споживання. Внутрішній розподіл нафти у межах резервуарного господарства здійснюється з метою підготовки сировини до операцій з вимірювання, змішування чи подальшого комерційного використання.

Особливості експлуатації резервуарного парку полягають у необхідності забезпечення зберігання нафти різних сортів з одночасною підтримкою технологічної гнучкості. Це передбачає наявність декількох незалежних резервуарів, які можуть бути використані як для тимчасового накопичення, так і для виконання операцій змішування або оперативної перекачки. З метою підвищення ефективності використання об'ємного простору реалізується принцип високої інтенсивності приймання й відпуску нафти, що вимагає значної насосної потужності. Подача сировини може досягати десятків тисяч кубічних метрів на годину, що створює високі гідродинамічні навантаження на систему трубопроводів і арматури.

З конструктивного погляду резервуар є великогабаритним вертикально орієнтованим сталевим циліндром, побудованим за методом рулонного складання або зварювання спірально вигнутих листів. Геометрія резервуара визначає його експлуатаційні межі: нижній рівень вказує на мінімальний об'єм, при якому відкачування залишається технічно можливим, тоді як верхній рівень встановлюється з урахуванням граничної наповнюваності без порушення герметичності або стабільності конструкції. Вихід за межі допустимого рівня може бути спричинений відмовою автоматичних систем керування, що зумовлює необхідність багаторівневої діагностики й страхування.

Для забезпечення достовірного контролю об'єму нафти в резервуарі

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

застосовуються спеціальні калібрувальні таблиці, що дають змогу визначити фактичну масу чи об'єм рідини на основі точних геометричних вимірювань рівня. Приймання нафти до резервуарів здійснюється через входні трубопроводи, у той час як виведення сировини – через розподільні канали. У деяких випадках трубопроводи можуть виконувати обидві функції – як приймання, так і відпуску, що оптимізує топологію трубопровідної мережі.

Гідравлічне з'єднання між резервуарами й колекторами здійснюється через спеціально спроектовані з'єднувальні трубопроводи, на яких встановлюються запірні пристрої. Вони забезпечують ізоляцію окремих резервуарів у разі технічного обслуговування або аварійної ситуації, знижуючи ризик розповсюдження загрози на весь об'єкт. У деяких випадках передбачено наявність дублюючих відсікачів, що активуються у разі відмови основного обладнання. Така надмірність конструкції забезпечує додатковий рівень надійності у функціонуванні резервуарного комплексу.

### **1.3 Резервуарний парк**

Резервуарний парк становить складну інженерну систему, призначену для організованого приймання, зберігання, підготовки та подальшої перекачки нафти або рідких вуглеводневих продуктів. Його структура базується на сукупності взаємопов'язаних резервуарів, які об'єднані в єдину технологічну мережу з використанням трубопроводів, запірної арматури, насосного обладнання та систем управління. Інфраструктура резервуарного парку доповнюється технологічними рішеннями, спрямованими на мінімізацію втрат продукту, підвищення безпеки об'єкта та забезпечення пожежогасіння.

Функціональне призначення резервуарного парку не обмежується лише акумулюванням рідини. Він виконує роль буферного об'єкта для стабілізації навантаження на магістральні трубопроводи, що дозволяє узгоджувати режими роботи окремих ділянок транспортної системи. Крім того, резервуари використовуються для створення аварійного або стратегічного запасу, що

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

забезпечує адаптивність функціонування системи в умовах непередбачуваних змін у споживанні або транспортуванні. У межах парку також можуть виконуватись технологічні операції, пов'язані з підігріванням, змішуванням, а також доведенням сировини до визначеної кондиції для її подальшого використання або реалізації. Під час товарно-комерційних процедур резервуари служать базою для проведення точного кількісного обліку вуглеводневої продукції.

У проєктному аспекті резервуарні парки класифікуються за способом розміщення резервуарів на надземні, наземні, напівпідземні, підземні та підводні. У практиці промислової експлуатації найпоширенішими є сталеві вертикальні циліндричні резервуари, обладнані стаціонарним або плаваючим дахом, а також понтонами або іншими спеціалізованими конструктивними елементами. Напівпідземні резервуари часто виконуються із залізобетону, з додатковою внутрішньою герметизацією металевими листами. Конструкція резервуарів враховує потребу в надійному захисті від зовнішніх впливів, забезпеченні герметичності, можливості обслуговування, а також стабільності при заповненні до граничного рівня.

З точки зору просторової організації резервуари об'єднуються у групи з обмеженим об'ємом, що не перевищує 200 тисяч м<sup>3</sup>. Територіальне планування резервуарного парку враховує вимоги санітарної безпеки, протипожежного захисту та доступу до обслуговування. Зовнішній контур зазвичай обмежений земляними обвалуваннями або протипожежними проїздами. Загальна місткість парку, як правило, не перевищує 1 мільйон м<sup>3</sup> і визначається просторовими можливостями майданчика, що відводиться під розміщення.

У складі нафтоперекачувальних станцій (НПС) активно застосовуються резервуари типу РВСПК (вертикальні сталеві резервуари з плаваючою покрівлею), зокрема РВСПК-10000, РВСПК-20000, РВСПК-50000, а також резервуари типу РВС з жорстким дахом: РВС-100, РВС-200, РВС-300, РВС-400, РВС-500, РВС-700, РВС-1000, РВС-2000, РВС-3000, РВС-5000, РВС-10000, РВС-

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

20000. Конструкція передбачає резервування певного об'єму ємності, призначеного для аварійного скиду, що відповідає двогодинній пропускній здатності нафтопроводу, що обслуговується (рис. 1.2).

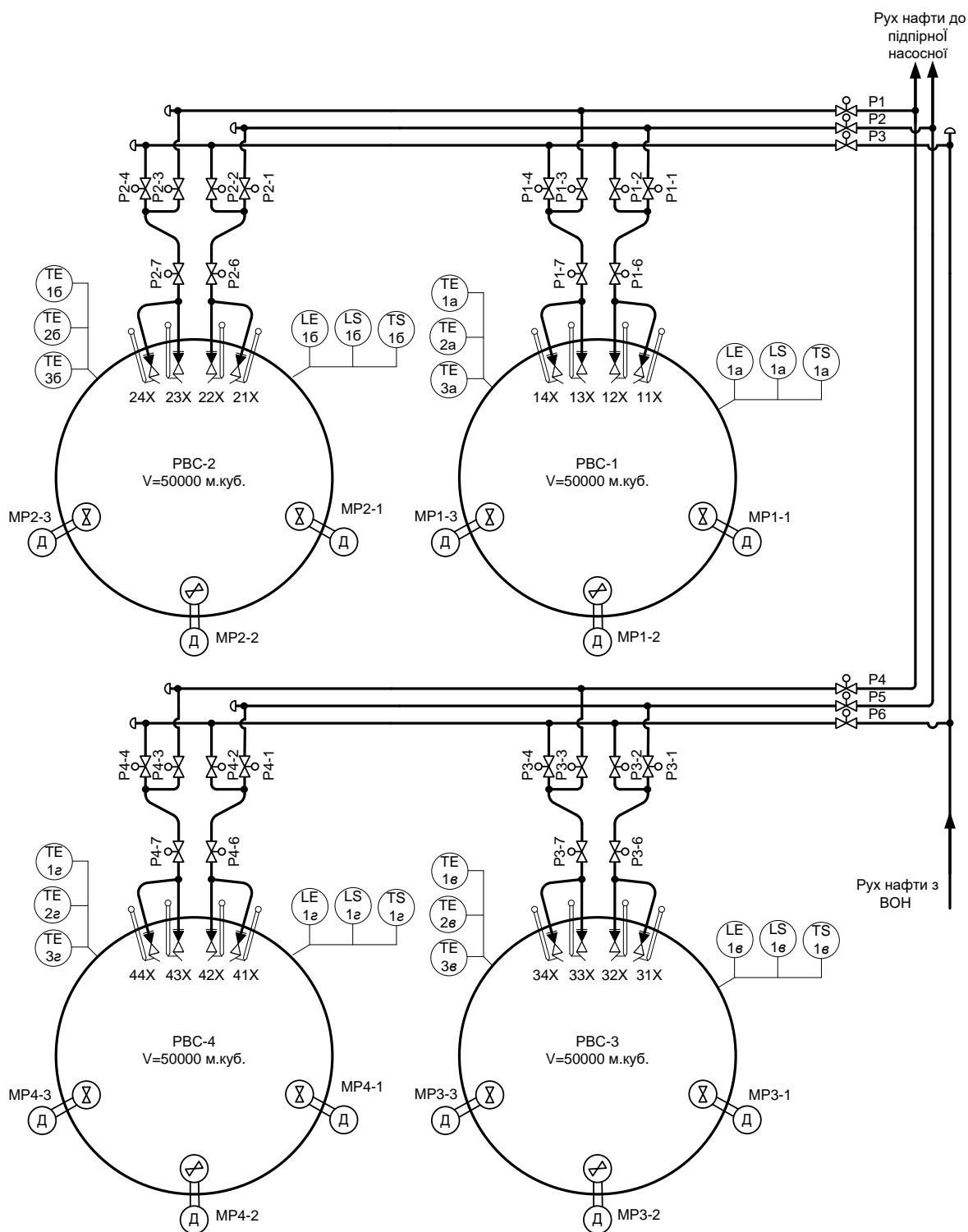


Рисунок 1.2 – Схема автоматизації резервуарного парку

Для підтримання якості сировини та запобігання накопиченню

					Арк.	
					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	17	

парафіністих фракцій у придонному шарі резервуари обладнуються міксерами. Прикладом може слугувати тип Jensen 650 VA-25, що має змінний кут нахилу робочого елемента. Ці пристрої створюють турбулентний потік, який руйнує осащений парафіновий шар і забезпечує рівномірність температурного поля в об'ємі рідини. Для періодичного зливу підтоварної води резервуари оснащені сифонними кранами, що дозволяє уникнути впливу водяного шару на якість продукту.

Система вимірювання рівня, температури та пожежної безпеки є складовою частиною комплексу автоматизації. Для контролю за рівнем наливу встановлюються сигналізатори максимального рівня типу СРР, радарні датчики рівня (наприклад, RTG), а також термодатчики з трьома вимірювальними точками, розміщеними на різній висоті резервуара. У складі системи пожежної безпеки передбачені датчики полум'я, зокрема типу ПІ-103, які забезпечують оперативне виявлення вогнища займання й автоматичне спрацювання протипожежних систем.

Експлуатація резервуарного парку здійснюється відповідно до технологічної карти, у якій фіксується характеристика кожного резервуару. Вказуються його технічні параметри, включно з типом, геометричними розмірами, допустимими рівнями заповнення, характеристиками дихальних клапанів, швидкісними параметрами заповнення і спорожнення. Також визначаються допустимі режими експлуатації, графік обслуговування й правила реагування на аварійні ситуації.

Захист резервуарного господарства від атмосферних розрядів реалізується за допомогою блискавковідводів, які встановлюються поза межами обвалування. Додатково вживаються заходи для зниження ризику накопичення електростатичних зарядів. Для цього плаваючий дах з'єднується з металевим корпусом резервуара за допомогою кількох гнучких мідних провідників, що забезпечує ефективне заземлення й перешкоджає виникненню іскрових розрядів.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

## 1.4 Конструкції та обладнання резервуарів

Конструктивне виконання резервуарів, призначених для зберігання нафти, визначається низкою вимог, серед яких особливої ваги набувають вимоги пожежної безпеки, технологічної надійності та довговічності. Для досягнення відповідного рівня пожежної безпеки в конструкції резервуарів застосовують матеріали, що не здатні до займання, зокрема, переважно використовують сталеві конструкції. Проте залежно від технологічного призначення та умов експлуатації можуть бути використані резервуари, виготовлені з бетону або залізобетону. За способом розміщення у просторі розрізняють наземні, підземні та частково заглиблені конструкції.

Сталеві резервуари характеризуються достатньою механічною міцністю, що дає змогу забезпечити герметичність при значному внутрішньому тиску. Стінки таких резервуарів зазвичай мають товщину на рівні  $14 \pm 6$  мм, тоді як товщина сталевих покрівель не перевищує 2,5 мм. Залізобетонні конструкції, які менш чутливі до температурних змін, частіше використовують для зберігання мазуту або легких сортів масел. При цьому внутрішня поверхня резервуару обов'язково покривається суцільним захисним шаром, який перешкоджає проникненню продукту крізь структуру бетону, запобігаючи фільтрації та втратам рідини.

Формоутворення резервуарів варіюється відповідно до технологічних потреб. Переважають вертикальні або горизонтальні конструкції, виконані у вигляді циліндрів або сфероїдів. Вертикальні сталеві резервуари, об'ємом від 100 до 120 000 м<sup>3</sup>, можуть мати як стаціонарні, так і плаваючі покрівлі типу понтона. Горизонтальні резервуари з об'ємом від 3 до 200 м<sup>3</sup> можуть розташовуватись як на поверхні, так і під землею. Днища резервуарів можуть бути виконані у сферичній, плоскій або конічній формі — залежно від вимог до експлуатації, зокрема осушення, миття чи дренажу.

У конструкцію резервуарів включають ряд технічних засобів, що забезпечують обслуговування, контроль і безпеку експлуатації. Передбачено

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

наявність люків для проведення внутрішніх оглядів, технічного обслуговування, очищення та вентиляції, а також пристроїв для освітлення внутрішнього простору. Пробовідбірники дозволяють здійснювати відбір зразків рідини з різних рівнів резервуару для подальшого аналізу.

Задля запобігання проникненню вогню всередину резервуару, в конструкцію включають вогнезахисні пристрої. Для боротьби з пожежами резервуари обладнуються спеціальними пенокамерами. Відкачування продукту здійснюється за допомогою шарнірного підйомного трубопроводу, який дозволяє регулювати висоту забору нафти. Захист від надлишкового тиску та втрати легких фракцій забезпечують дихальні та запобіжні клапани. У штатному режимі дихальний клапан функціонує як механізм регулювання тиску парової фази всередині резервуару: при його перевищенні клапан відкривається, вивільняючи надлишковий тиск, а при зниженні — впускає повітря, стабілізуючи внутрішній тиск. Запобіжний клапан слугує резервною системою захисту і спрацьовує у випадку відмови основного дихального клапана або при його некоректній роботі.

### **1.5 Резервуарний парк як об'єкт управління**

Резервуарний парк розглядається як складний технологічний об'єкт, що функціонує в умовах підвищених вимог до безпеки, енергоефективності та точності обліку. Основна мета впровадження автоматизованої системи управління полягає у забезпеченні централізованого контролю за всіма етапами зберігання, приймання й відпуску нафтопродуктів, що супроводжується мінімізацією людського втручання та підвищенням надійності технологічних операцій.

Управління резервуарним парком передбачає віддалене регулювання процесів наповнення і спорожнення резервуарів, контроль за станом запірно-регулюючої арматури на трубопроводах приймання та зливу, моніторинг параметрів обліку об'ємів нафтопродуктів, а також координацію роботи

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

насосного обладнання. Усі ці функції мають бути інтегровані в єдину автоматизовану систему з можливістю централізованого управління, що дозволяє оперативно реагувати на зміну технологічних параметрів.

Перед тим як резервуарний парк розглядати як об'єкт автоматичного управління, необхідно врахувати декілька принципово важливих аспектів. По-перше, значення має уніфікація обладнання, тобто необхідність використання типових конструктивних рішень і елементів автоматизації, що спрощують технічне обслуговування й модернізацію. По-друге, оцінка параметрів окремого резервуара повинна здійснюватись у контексті загального технологічного стану усього парку, оскільки взаємодія між об'єктами є критичною для забезпечення балансу навантажень та динаміки потоків.

Особливої уваги потребує автоматизація систем протипожежного захисту та пожежогасіння, враховуючи високу ступінь займистості речовин, що зберігаються. Енергонезалежність резервуарного парку повинна гарантуватись наявністю резервних систем електроживлення та обладнання телемеханічного типу, що набуває особливого значення у випадках розміщення об'єкта на віддалених територіях, віддалених від житлової інфраструктури. Крім того, технологія автоматичного управління повинна бути орієнтована на мінімізацію економічних втрат, оскільки резервуарний парк має стратегічне значення в масштабах держави.

Підвищення швидкості наповнення та спорожнення резервуарів досягається шляхом автоматизованого підключення до трубопроводів, що виконують функції перекачування. У цьому контексті особливу роль відіграє продуктивність насосних станцій, яка безпосередньо впливає на швидкість обробки потоків рідин. Координація їхньої роботи повинна здійснюватися за допомогою програмованих логічних контролерів із урахуванням динамічної зміни навантаження.

Контур автоматизації резервуарного парку базується на використанні електричних схем керування та контролю, які забезпечують надійний зворотний

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

зв'язок між датчиками, виконавчими механізмами та операційними станціями. Центральний пункт керування акумулює всі вхідні сигнали та виконує алгоритмічне управління, що передбачає контроль рівня рідини з точністю до 1 мм, цифрову передачу даних для усунення похибок, а також електронну обробку інформації з виведенням результатів у стандартизованих одиницях вимірювання.

### **1.6 Визначення маси нафти у заходах місткості**

Процедура визначення маси нафти в резервуарах базується на використанні різних методів вимірювання, серед яких особливого значення набувають як непрямі, так і прямі статичні методи, а також методи, засновані на гідростатичному принципі.

У рамках непрямого методу статичних вимірювань обсяг нафти встановлюється за допомогою градуювальних таблиць, у які вводяться результати вимірювання висоти нафтового стовпа. Щільність визначається або за результатами лабораторного аналізу відібраних зразків, або шляхом використання переносних густиномірів. Після приведення значення щільності до умов обліку, обчислення маси здійснюється як добуток об'єму та відповідної щільності, що забезпечує узгодженість з умовами температурної компенсації.

При прямому методі використовується масове зважування: спочатку визначається маса порожньої заходи місткості, після чого фіксується маса з заповненою нафтою. Різниця між цими значеннями і є масою бруто нафти. Такий підхід особливо застосовний у випадках, коли можлива реалізація високоточної вагової фіксації.

Іншим варіантом непрямого вимірювання є застосування гідростатичного принципу, де основою для розрахунку маси нафти слугує вимірювання гідростатичного тиску. У цьому випадку обчислення відбувається за допомогою спеціалізованих таблиць, які враховують глибину стовпа рідини, густину та конфігурацію резервуара.

У практиці обліку маси нафти важливим етапом є двогодинне

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

відстоювання продукту, що дозволяє забезпечити осадження підтоварної води й механічних домішок, після чого проводиться дренування нижнього шару. Це необхідно для уникнення похибок, пов'язаних із присутністю водоемульсійного шару.

Визначення рівня нафти й підтоварної води здійснюється за допомогою вимірювальних рулеток, рівнемірів, а також електронних засобів вимірювання. При застосуванні рулеток важливо дотримуватись процедурної дисципліни: попередньо очищується стрічка, контролюється вертикальність опускання лота, а після зняття виміру стрічку ретельно протирають. Усі вимірювання виконуються з точністю до міліметра, а отримані значення підлягають повторному зняттю з метою верифікації результатів. Якщо відхилення між двома вимірами перевищує допустимий поріг, проводиться додаткове вимірювання з подальшим усередненням найбільш близьких результатів.

Особливе місце в процедурі займає поняття базової висоти резервуара — параметра, що визначає відстань від умовного нуля до верхньої межі вимірювання. Цей параметр щорічно піддається перевірці. У випадках, коли фактичне значення базової висоти суттєво відрізняється від паспортного, необхідно встановити причину розбіжності й усунути її. У період усунення відхилень вимірювання можуть здійснюватися шляхом визначення висоти вільного простору в резервуарі.

З метою підвищення достовірності даних рівень підтоварної води фіксується за допомогою спеціально обробленої стрічки або водочутливої пасти. При цьому пасту або стрічку наносять на протилежні сторони лота, а сам лот витримується у статичному положенні протягом кількох хвилин, що дозволяє сформувати чітке розмежування між водним та нафтовим шарами. За відсутності чіткої межі або при її розмитості вимірювання відкладається до моменту повного розшарування емульсії.

Для кожного з методів вимірювання та типів резервуарів застосовуються відповідні нормативно-технічні документи, зокрема ДСТУ 4147 для

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

вертикальних сталевих резервуарів, ДСТУ 4218:2003 для горизонтальних резервуарів, а також нормативи для залізобетонних резервуарів, залізничних і автоцистерн, танків річкових та морських суден. Дотримання цих нормативів гарантує точність вимірювань та правомірність облікових операцій.

*Визначення фактичного обсягу нафти в резервуарі.* Загальний обсяг нафти в резервуарі і об'єм підтоварної води визначають за градуювальної таблиці на конкретний резервуар. Фактичний обсяг нафти в резервуарі обчислюють за формулою

$$V_H = V_0[1 + (2a_{ст} + a_s) \cdot (t_{ст} - 20)], \quad (1.1)$$

де  $V_0$  - обсяг нафти в резервуарі по градуювальній таблиці, м<sup>3</sup>, що визначається за формулою

$$V_0 = V_{ж} - V_{в}, \quad (1.2)$$

де  $V_{ж}$  - об'єм рідини (нафта і підтоварна вода), що визначається за градуювальної таблиці резервуара, складеної для температури 20 °С за ДСТУ 4147-2003, м<sup>3</sup>  $V_{в}$  - об'єм підтоварної води в резервуарі, який визначається за градуювальної таблиці резервуара, складеної для температури 20 °С за ДСТУ 4147-2003, м<sup>3</sup>; а  $a_{ст}$  - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стінки резервуара, значення якого приймають рівним  $12,5 \cdot 10^{-6}$  1/°С;  $a_s$  - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу засоби вимірювань рівня, значення якого при вимірюваннях рівня рулеткою з нержавіючої сталі  $a_s$  приймають рівним  $12,5 \cdot 10^{-6}$ , 1/°С. При вимірах рівня нафти рулеткою по висоті порожнечі резервуара, а також при вимірюваннях рівня нафти рівнемірами приймають  $a_s = 0$ ;  $t_{ст}$  - температура стінки резервуара, прийнята рівною температурі нафти в резервуарі.

*Визначення щільності нафти в заході місткості.* Щільність нафти вимірюють Плотноміри відповідно до інструкції з експлуатації на даний тип або за ДСТУ 4147-2003 або за ГОСТ Р51069 по об'єднаній пробі нафти, відібраної з резервуара. Значення щільності приводять у відповідність до температури вимірювання об'єму нафти в резервуарі і до стандартних умов ДСТУ 4147-2003 або ДСТУ 4147-2003.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

*Визначення температури нафти в заході місткості.* Середню температуру нафти в заході місткості визначають за допомогою стаціонарних перетворювачів температури або перетворювача температури в складі електронної рулетки відповідно до вимог інструкції з експлуатації одночасно з вимірюваннями рівня або вручну шляхом її вимірів при відборі точкових проб.

При відборі об'єднаної проби стаціонарними пробовідбірниками в один прийом (ДСТУ 4488:2005) визначають середню температуру нафти шляхом вимірювань температури цієї проби термометром.

При відборі точкових проб температуру нафти в пробі визначають протягом 1.3 хвилин після відбору проби, при цьому переносний пробовідбірник витримують на рівні відібраної проби протягом не менше п'яти хвилин. Термометр занурюють в нафту на глибину, зазначену в технічному паспорті на даний термометр, і витримують в пробі до прийняття стовпчиком ртуті постійного положення.

Середню температуру нафти розраховують по температурі точкових проб, використовуючи співвідношення для складання об'єднаної проби з точкових по ДСТУ 4488:2005 [1].

Визначення маси бруто нафти в заході місткості. Масу бруто нафти, в тоннах, у заході місткості обчислюють за формулою

$$M_{бр} = V_{н}\rho_{н} \times 10^{-3} , \quad (1.3)$$

де  $\rho_{н}$  - густина нафти за температури вимірювань об'єму в резервуар, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{н}$  - фактичний обсяг нафти в резервуарі, м<sup>3</sup>.

*Визначення маси бруто нафти при відкачці із заходів місткості.* При відкачці нафти із заходів місткості (резервуара) масу зданої нафти визначають як різницю первісної маси і маси залишку. Масу зданої нафти  $M_{сд}$  обчислюють за формулою

$$M_{сд} = M_{н1} - M_{н2} , \quad (1.4)$$

де  $M_{н1}$  - маса нафти до початку відкачки, т;  $M_{н2}$  - маса залишку нафти, певна після відкачування нафти з резервуару, т.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

*Визначення маси брутто нафти при закачуванні нафти в заходи ємності. При закачуванні нафти в заходи ємності (в резервуари, танки наливних судів, залізничні цистерни) масу прийнятої нафти  $M_{пр}$  обчислюють за формулою*

$$M_{пр} = M_{H_2} - M_{H_1}. \quad (1.5)$$

*Визначення вмісту баласту в нафти в заходи ємності проводять у випробувальній лабораторії з використанням проб, що відбираються відповідно до ДСТУ 4488:2005.*

*При автоматизованих вимірюваннях маси нафти в заходи ємності рівень нафти вимірюють рівнеміром, що входять до складу автоматизованої системи обліку. Щільність нафти визначають по каналу вимірювань щільності АСУ, або по об'єднаній пробі нафти, відібраної за ДСТУ 4488:2005. Температуру нафти вимірюють автоматично, використовуючи канал вимірювань температури автоматизованої системи обліку.*

### **Висновки до розділу**

У цьому розділі було розглянуто методологію визначення фактичного обсягу нафти в резервуарах, а також основні принципи вимірювання і корекції параметрів обсягу і маси нафти з урахуванням температурних впливів та фізичних властивостей матеріалів резервуара і засобів вимірювань. Було обґрунтовано використання градувальних таблиць, складених відповідно до нормативних документів, а також наведено формули для коригування обсягу нафти залежно від температури стінок резервуара і характеристик матеріалів, що беруть участь у вимірювальному процесі. Визначення щільності нафти виконують із застосуванням спеціалізованих приладів або відповідно до вимог стандартів, а отримані значення приводять до стандартних умов для уніфікації даних.

Особливу увагу приділено методам вимірювання температури нафти, які базуються на застосуванні стаціонарних та переносних перетворювачів

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

температури, що забезпечує отримання середніх температурних значень із необхідною точністю. Зазначено важливість дотримання термінів та процедур вимірювань для забезпечення достовірності результатів.

Розглянуто методи визначення маси брутто нафти у резервуарах та при її відкачці або закачуванні, що базуються на різниці мас до та після технологічних операцій, що дозволяє вести точний облік нафтопродуктів. Визначення вмісту баласту у нафті відбувається у випробувальних лабораторіях відповідно до нормативних вимог.

Також висвітлено особливості автоматизованих систем обліку, які інтегрують вимірювання рівня, щільності та температури нафти для забезпечення оперативного і точного контролю за станом запасів у резервуарах. Загалом, викладені у розділі положення формують науково обґрунтовану основу для організації якісного обліку та контролю обсягів і маси нафтопродуктів у ємностях з урахуванням фізико-хімічних та температурних факторів.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЕМ В РЕЗЕРВУАРАХ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У ПАРІ**

### **2.1 Опис процесу та ідентифікація об'єкту керування**

Система автоматизованого керування рівнем у резервуарах, що функціонують у взаємозв'язаному режимі (у парі), є складним технічним об'єктом, який поєднує у собі особливості гідродинамічного середовища, взаємного впливу об'єктів накопичення, а також високі вимоги до точності, стабільності й адаптивності регуляторної частини. У таких системах забезпечення сталої роботи зумовлюється не лише необхідністю підтримки заданого рівня в кожному окремому резервуарі, але й необхідністю узгодженого керування потоками рідини між ними, що вимагає врахування взаємозалежної динаміки обох об'єктів.

У контексті спареного функціонування резервуари можуть бути об'єднані як послідовно, так і паралельно через систему трубопроводів, насосів або клапанів. Це створює складну мережу потокорозподілу, яка реагує на будь-які зміни об'ємів у кожному з резервуарів, впливаючи на загальний режим системи. З погляду автоматизації, така система вимагає використання координованих регуляторів, які можуть обробляти інформацію не лише локального характеру (наприклад, значення рівня в одному резервуарі), але й глобального — з урахуванням стану суміжного резервуара та характеру технологічного процесу, в який вбудовано цю систему.

Обґрунтування необхідності автоматизованого регулювання рівня базується на тому, що резервуари, особливо при зберіганні рідин у промислових умовах (нафтопродукти, хімічні реагенти, вода для технологічних потреб тощо), повинні забезпечувати не лише стабільне зберігання, але й контрольовану подачу відповідно до виробничого навантаження. Порушення рівня може спричинити як технічні, так і екологічні або економічні ризики — перелив,

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

дефіцит, коливання тиску в системі тощо.

У межах такої системи доцільно реалізувати автоматичне регулювання за допомогою контурів зі зворотним зв'язком. Сенсори рівня встановлюються в кожному резервуарі, і на основі їх показників формується сигнал помилки, що характеризує відхилення поточного рівня від заданої величини. Цей сигнал обробляється керуючим пристроєм, зазвичай реалізованим у вигляді програмованого логічного контролера (ПЛК), який формує управляючий вплив на виконавчі механізми — регулюючі клапани або частотні перетворювачі насосів (рис. 2.1).

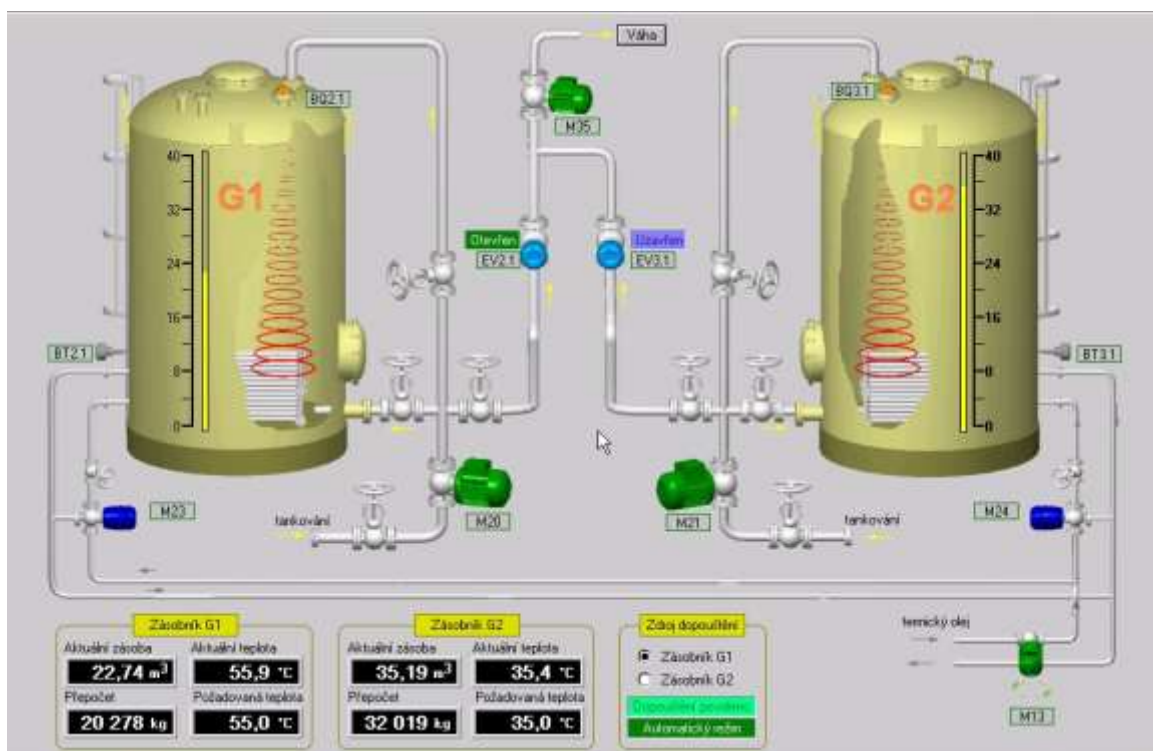


Рисунок 2.1 – Вигляд установки для імітації роботи резервуарів, що працюють у парі

Особливе значення має алгоритм керування. При наявності двох резервуарів, які працюють у парі, ефективною є система із взаємопов'язаними контурами керування. Один контур може підтримувати загальний середній рівень рідини в обох резервуарах, тоді як другий — балансувати між ними, компенсуючи несиметричні навантаження. Така стратегія дає змогу уникнути

резонансних режимів і нестійких коливань, характерних для розімкнених або автономних систем. Для досягнення високої точності регулювання можуть бути впроваджені адаптивні або модальні регулятори, здатні змінювати свої параметри в залежності від динаміки процесу, або використовуватись методи предиктивного керування з урахуванням майбутніх змін у зовнішніх навантаженнях.

Враховуючи реальні умови експлуатації, в автоматизовану систему можуть інтегруватися елементи діагностики стану обладнання (насосів, клапанів), інтерфейси людино-машинного спілкування (HMI), а також мережеві модулі для обміну даними з іншими технологічними ланками. Систему можна побудувати на основі SCADA-платформи, що дозволяє здійснювати централізований моніторинг, архівування даних та реалізацію логіки керування в розподіленому середовищі.

## 2.1 Формування завдання для синтезу АСК

Поставлено завдання розробити автономну систему автоматичного керування гідравлічним об'єктом, структурною основою якого є дві вертикально орієнтовані циліндричні ємності. Вказані ємності гідравлічно пов'язані трубопроводом, що має локальний опір, вплив якого описується за допомогою відповідного коефіцієнта місцевого гідравлічного спротиву. Така конфігурація моделює просторово розташовану систему з міжємнісним обміном, динаміка якої істотно залежить від характеристик внутрішнього спротиву та взаємодії потоків.

Регулювання масових витрат рідини, що надходить у кожную з ємностей, здійснюється шляхом зміни ступеня відкриття виконавчих елементів, які забезпечують контрольовану подачу води. Керування ними ґрунтується на використанні статичних характеристик у вигляді залежностей витрати від тиску на вході, який у цьому випадку виступає як вхідна керуюча величина. Ці характеристики подаються у вигляді функцій , де індекс  $i = 1, 2$  відповідає

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

відповідному виконавчому механізму. Для математичного подання цих функцій доцільно застосувати інтерполяційний поліном Лагранжа n-го порядку, що забезпечує неперервне апроксимування функціональної залежності на основі заданих експериментальних або табличних значень.

Вихідні та вхідні тиски, що реалізуються на межі входу до кожної з гідравлічних ємностей, приймаються сталими протягом усього часу дослідження. Геометричні параметри ємностей задані у вигляді довжини  $L$  та діаметра  $D$ , що дозволяє визначити об'ємну характеристику та зв'язати рівень рідини із її масою або об'ємом через відому геометричну залежність.

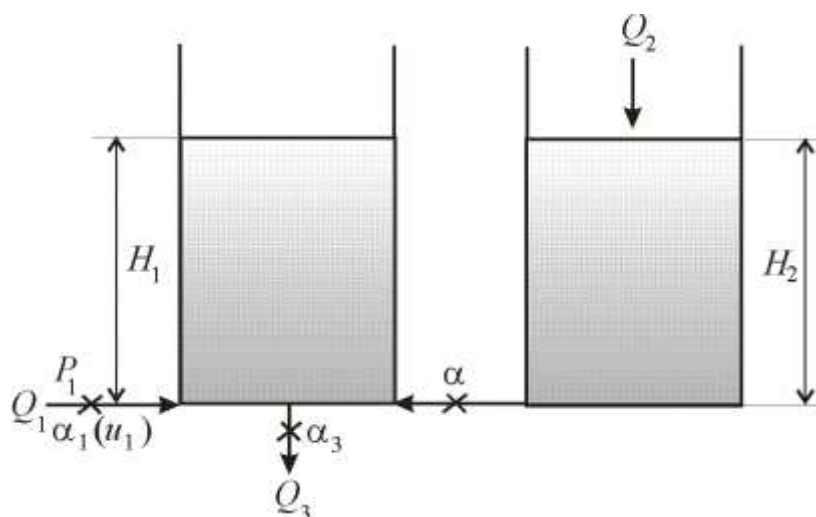


Рисунок 2.2 – Принципова схема резервуарів

З огляду на поставлену задачу, необхідно здійснити повноцінний синтез системи автоматичного регулювання, що охоплює низку етапів аналітичного, числового та програмно-імітаційного характеру. На першому етапі слід сформулювати математичну модель об'єкта, яка описує зміну рівнів у резервуарах під впливом вхідних витрат, взаємного перетікання через трубопровід та гравітаційного тиску. Наступним кроком є лінеаризація цієї моделі, що дозволить отримати систему лінійних диференціальних рівнянь для подальшого аналізу і синтезу регуляторів. Після цього потрібно здійснити розрахунок параметрів як вихідної нелінійної, так і лінеаризованої моделі на

основі заданих геометричних і фізичних характеристик системи.

Для зменшення впливу взаємних перехресних зв'язків, які можуть зумовлювати нестабільність або коливання в роботі кожного з каналів регулювання, необхідно здійснити синтез відповідного компенсатора. Такий компенсатор дозволяє декомпонувати систему на умовно незалежні контури керування, що спрощує налаштування регуляторів та підвищує керованість об'єкта.

У подальшому передбачено реалізацію алгоритму налаштування параметрів ПІ-регуляторів методом розміщення полюсів у площині комплексної частоти, що дозволить забезпечити задану динаміку системи та гарантувати її стійкість. Після цього необхідно провести повний аналіз стійкості замкненої системи керування з урахуванням динамічних властивостей об'єкта та синтезованих елементів регуляторної структури.

Фінальним етапом є побудова імітаційної моделі в середовищі MATLAB Simulink, яка дасть змогу візуалізувати перебіг процесів керування, оцінити динамічні характеристики системи — перехідний процес, стійкість, точність та чутливість до збурень. На основі отриманих результатів буде здійснено оцінку ефективності обраного підходу до автоматизованого керування рівнем у взаємопов'язаних гідравлічних ємностях.

Усі необхідні вихідні дані, включаючи геометричні параметри, тиски, витрати та характеристики виконавчих пристроїв, представлені у табличній формі. Робочим середовищем у розглянутому завданні є вода, що дозволяє використовувати сталу густину та спрощені залежності для гідравлічних розрахунків.

Таблиця 2.1 – Вхідні данні для синтезу АСК

Геом. розм. ємностей, <i>м</i>		Витрати, <i>кг/с</i>		Ном. значення, <i>м</i>			
$D_1$	$D_2$	$P_1$	$P_2$	$Q_1^{(0)}$	$Q_2^{(0)}$	$H_1^{(0)}$	$H_2^{(0)}$
0.6	0.6	-	0.15	19	20	0.7	1.0

Отримання статичної характеристики виконавчого механізму є важливою процедурою при побудові математичної моделі автоматизованої системи керування, оскільки саме ця характеристика визначає, як керуючий вплив (зазвичай у вигляді тиску або електричного сигналу) перетворюється на відповідну витрату робочої рідини. У випадку гідравлічних систем зі змінними витратами, виконавчі механізми, що регулюють потоки — наприклад, регулюючі клапани чи заслінки, — мають визначену залежність між ступенем відкриття або вхідним тиском і витратою.

Статична характеристика виконавчого механізму відображає усталений режим його роботи, коли всі змінні системи перебувають у рівновазі, тобто виключається динамічна інерційність, а вихідна величина (витрата) залежить лише від вхідної (тиску, напруги, положення). Отримання цієї залежності може здійснюватися двома шляхами: експериментально або на основі технічної документації виробника. У кожному разі необхідно побудувати функціональний зв'язок  $Q_i = f(p_i)$ , де  $Q_i$  — масова або об'ємна витрата рідини через  $i$ -й виконавчий механізм, а  $p_i$  — відповідний тиск на його вході.

Зазвичай дана залежність є нелінійною і визначається з урахуванням геометрії прохідного перерізу, характеристик потоку, а також наявності турбулентних чи ламінарних режимів. Отримані експериментальні точки у вигляді пари значень  $(p_i, Q_i)$  апроксимуються аналітичним виразом для подальшого використання у моделі. Найпоширенішим способом апроксимації є використання інтерполяційного полінома Лагранжа  $n$ -го порядку. Така побудова дозволяє створити безперервну, диференційовну функцію, що з великою точністю описує поведінку механізму в діапазоні керуючих дій [2].

## 2.2 Математична модель технологічного об'єкта

Метою моделювання є знаходження функціональної залежності між величинами  $H_1$  і  $H_2$  та  $U_1$  і  $q_2$ . Отже, вхідні величини — це  $U_1$  і  $q_2$ , а вихідні рівні в технологічних ємностях —  $H_1$  і  $H_2$  (рис. 2.3).

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

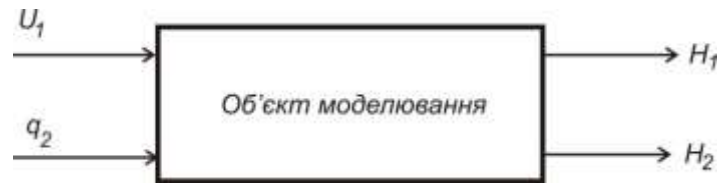


Рисунок 2.3 – Структурна схема об'єкта моделювання

Математичну модель об'єкта будемо складати при таких допущеннях:

- густина рідини постійна і не залежить від температури;
- поперечні січення вздовж довжини резервуара постійні і мають форму круга;

В основу математичної моделі покладемо рівняння матеріального балансу.

Для першої ємності:

$$\frac{dM_1}{dt} = q_1 + q_1' - q_3 \quad (2.1)$$

Для другої ємності [2,3,4,5]:

$$\frac{dM_2}{dt} = q_2 - q_1', \quad (2.2)$$

де:  $M_1$  і  $M_2$  – маси рідини у першій та другій ємностях відповідно;

$q_1, q_1', q_2, q_3$  - масові витрати рідини.

Масова витрата рідини  $q_1'$  обчислюється за формулою:  $q_1' = \alpha \sqrt{\rho g (H_2 - H_1)}$

Обчислимо тепер значення витрати, яка витікає з другої ємності.

$$q_3 = \alpha_3 \sqrt{\rho g H_1}, \text{ де}$$

$\alpha_3$  – гідравлічний опір витіканню рідини з ємності. Приймаємо  $\alpha_3 = \text{const}$ .

Знаходимо значення витрати на вході першої ємності.  $q_1 = \alpha_1 (U_1) \sqrt{P_1 - \rho g H_1}$ ,

де:  $\alpha_1$  - гідравлічний опір витіканню рідини з ємності.

Маса рідини в ємностях – це добуток густини рідини  $\rho$  на її об'єм  $V$ .

$$M_i = \rho V_i, \quad i=1,2,$$

де:  $V_i = \rho S_i H_i, \quad i=1,2$ .

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Підставляючи значення  $q_1, q_1', q_2, q_3$  в формули (2.1) і (2.2), отримуємо

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{1}{\rho S_1} \left( \alpha(U_1) \sqrt{\rho g (H_2 - H_1)} + \alpha_1 \sqrt{P_1 - \rho g H_1} - \alpha_3 \sqrt{\rho g H_1} \right), \quad (2.3)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{1}{\rho S_2} \left( q_2 - \alpha \sqrt{\rho g (H_2 - H_1)} \right). \quad (2.4)$$

Рівняння (2.3) і (2.4) утворюють математичну модель технологічного об'єкта.

### 2.3 Лінеаризована математична модель технологічного об'єкта

Будемо вважати, що відхилення вихідних величин  $H_1$  і  $H_2$  від своїх усталених значень  $H_1^{(0)}$  і  $H_2^{(0)}$  незначні. Це означає, що нелінійні функції, які входять до рівнянь (1.3) і (1.4), можна розкласти в ряд Тейлора, обмежившись лише лінійними членами розкладу [4,5,6,7].

Припустимо, що  $H_1 = H_1^{(0)} + \Delta H_1$ ,  $H_2 = H_2^{(0)} + \Delta H_2$ ,  $U_1 = U_1^{(0)} + \Delta U_1$  і  $q_2 = q_2^{(0)} + \Delta q_2$ .

Введемо такі позначення [4,5,6]:

$$F_1(U_1, H_1, H_2) = \frac{1}{\rho S_1} \left( \alpha \sqrt{\rho g (H_2 - H_1)} + \alpha_1 (U_1) \sqrt{P_1 - \rho g H_1} - \alpha_3 \sqrt{\rho g H_1} \right),$$

$$F_2(q_2, H_1, H_2) = \frac{1}{\rho S_2} \left( q_2 - \alpha \sqrt{\rho g (H_2 - H_1)} \right).$$

Тоді

$$\frac{d(\Delta H_1)}{dt} = a_{11} \Delta H_1 + a_{12} \Delta H_2 + b_{11} \Delta U_1,$$

$$\frac{d(\Delta H_2)}{dt} = a_{21} \Delta H_1 + a_{22} \Delta H_2 + b_{22} \Delta q_2,$$

де

$$a_{11} = \left( \frac{\partial F_1(U_1, H_1, H_2)}{\partial H_1} \right)_0, \quad a_{12} = \left( \frac{\partial F_1(U_1, H_1, H_2)}{\partial H_2} \right)_0,$$

$$a_{21} = \left( \frac{\partial F_2(q_2, H_1, H_2)}{\partial H_1} \right)_0, \quad a_{22} = \left( \frac{\partial F_2(q_2, H_1, H_2)}{\partial H_2} \right)_0,$$

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$b_{11} = \left( \frac{\partial F_1(U_1, H_1, H_2)}{\partial U_1} \right)_0, \quad b_{22} = \left( \frac{\partial F_2(q_2, H_1, H_2)}{\partial q_2} \right)_0.$$

Нехай  $y_1 = \Delta H_1, y_2 = \Delta H_2, u_1 = \Delta U_1, u_2 = \Delta q_2$ .

Тоді отримаємо:

$$\frac{dy_1}{dt} = a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + b_{11}u_1, \quad (2.5)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + b_{22}u_2. \quad (2.6)$$

Отже, рівняння (2.5) і (2.6) утворюють лінеаризовану математичну модель технологічного об'єкта [3].

### 2.3 Обчислення параметрів нелінійної математичної моделі

Обчислимо параметри нелінійної математичної моделі, яка подана у вигляді диференціальних рівнянь (2.3) і (2.4).

Розглянемо статичний режим роботи об'єкта, коли  $H_1 = H_1^{(0)} = const$  і  $H_2 = H_2^{(0)} = const$ . Тоді

$$q_1^{(0)} = \alpha \sqrt{\rho g (H_2^{(0)} - H_1^{(0)})}.$$

Звідси знаходимо

$$\alpha = \frac{q_1^{(0)}}{\sqrt{\rho g (H_2^{(0)} - H_1^{(0)})}}.$$

Враховуючи, що  $q_1^{(0)} = q_1^{(0)}$ , маємо

$$\alpha = \frac{q_1^{(0)}}{\sqrt{\rho g (H_2^{(0)} - H_1^{(0)})}}.$$

Тепер знаходимо

$$\alpha_3 = \frac{q_3^{(0)}}{\sqrt{\rho g H_1^{(0)}}}.$$

Оскільки  $q_3^{(0)} = q_1^{(0)} + q_2^{(0)}$ , то

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$\alpha_3 = \frac{q_1^{(0)} + q_2^{(0)}}{\sqrt{\rho g H_1^{(0)}}}. \quad (2.7)$$

Аналогічно знаходимо величину

$$\alpha_1^{(0)} = \alpha_1(U_1^{(0)}) = \frac{q_1^{(0)}}{\sqrt{P_1^{(0)} - \rho g H_1^{(0)}}}. \quad (2.8)$$

Параметри нелінійної моделі (2.7) і (2.8) обчислені з використанням програмного продукту MatLab і відповідна програма наведений у додатка А [6,7].

#### 2.4 Апроксимація статичної характеристики регулюючого органу

Для опису статичних характеристик регулюючого органу  $\alpha_1(U_1)$  використаємо поліном Лагранжа. Вихідні дані для апроксимації отримуємо із графіка залежності  $\alpha_1(U_1)$ . Такі дані носять назву детермінованих і вони породжені власними функціями виконавчих органів, аналітичний вид яких нам невідомий. Функцією апроксимації називають деяку залежність, яка у відповідності з певним критерієм замінює власну функцію. Критерій наближення формулюється як вимога, щоб у заданих вузлових точках, значення власної функції і функції апроксимації співпадали.

В такому задача апроксимації формулюється наступним чином. Нехай  $N$  – число вузлів апроксимації, а  $n=N-1$  – степінь інтерполяційного полінома. Необхідно знайти поліном степені  $n$ , щоб в точках апроксимації його значення співпадали зі значеннями власної функції.

Розв'язок поставленої задачі приводить до такого інтерполяційного полінома Лагранжа

$$P(u) = \sum_{i=1}^N y_i \frac{\prod_{s=1, s \neq i}^N (u - u_s)}{\prod_{s=1, s \neq i}^N (u_i - u_s)}.$$

В нашому випадку для побудови інтерполяційного полінома використано  $N=6$  вузлів. Необхідні дані для побудови інтерполяційного полінома занесені в табл. 2.2.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для побудови інтерполяційного полінома

$U_1 \cdot 10^6, Па$	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
$\alpha_1(U_1), кг/(с \cdot Па^{1/2})$	0	0,044	0,068	0,082	0,092	0,1

Оскільки для інтерполяції ми вибрали  $N=6$  вузлів, то інтерполяційний поліном матиме такий вигляд:

$$P(u) = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + a_4 u^4 + a_5 u^5. \quad (2.9)$$

Оскільки для статичного режиму має місце співвідношення

$$\alpha_1 = a_0 + a_1 u^{(0)} + a_2 u^{(0)2} + a_3 u^{(0)3} + a_4 u^{(0)4} + a_5 u^{(0)5},$$

то для обчислення  $u^{(0)}$  необхідно розв'язати рівняння

$$A_1^{(0)} + a_1 u^{(0)} + a_2 u^{(0)2} + a_3 u^{(0)3} + a_4 u^{(0)4} + a_5 u^{(0)5} = 0, \quad (2.10)$$

де  $A_1^{(0)} = a_0 - \alpha_{10}$ .

### Висновки до розділу

У цьому розділі здійснено побудову математичної моделі технологічного об'єкта, що складається з двох ємностей, гідравлічно з'єднаних трубопроводом із локальним опором. З урахуванням фізичних припущень, зокрема постійної густини робочого середовища та незмінного поперечного перерізу ємностей, модель сформульовано на основі рівнянь матеріального балансу, що відображають зміну маси рідини у кожній ємності залежно від витрат на вході та виході.

Сформульована система нелінійних диференціальних рівнянь виражає динаміку рівнів у ємностях як функцію поданих витрат. Проведено процедуру лінеаризації цієї моделі навколо усталеного режиму функціонування з використанням розкладу в ряд Тейлора з урахуванням лише лінійних членів. Це дозволило отримати зручну для аналізу та синтезу регуляторів лінеаризовану модель об'єкта.

Також розглянуто методику обчислення параметрів нелінійної моделі в умовах стаціонарного режиму, коли часові похідні рівнів дорівнюють нулю. Це

забезпечило визначення рівноважних значень витрат та рівнів, необхідних для коректної параметризації моделі.

Крім того, виконано апроксимацію статичної характеристики регулюючого органу за допомогою полінома Лагранжа на основі експериментальних даних, отриманих з графічної залежності між керуючим сигналом і витратою. Побудовано інтерполяційний поліном шостого порядку, що дозволяє чисельно оцінювати значення витрати залежно від заданого сигналу керування.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

### 3 СИНТЕЗ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

#### 3.1 Процедура розробки система автоматичного керування

Побудова ефективної автономної системи керування передбачає формалізацію об'єкта в термінах його математичного опису та подальше застосування інструментів теорії керування для переходу до зручної для аналізу форми – передавальної функції. Модель об'єкта, представлена у формі рівняння (2.10), є відправною точкою для формулювання динамічних властивостей системи в області зображень. Для цього необхідно здійснити операцію перетворення Лапласа, приймаючи, що початкові умови не впливають на динаміку системи в момент початку аналізу, тобто є нульовими.

У результаті застосування цього перетворення отримаємо матричне рівняння в області Лапласа, яке дозволяє експліцитно виразити залежність вектора стану або виходу системи від вхідного впливу [5,6,7]. Це рівняння приймає вигляд:

$$p\bar{y}(p) = A\bar{y}(p) + B\bar{u}(p).$$

Із останнього рівняння знаходимо

$$\bar{y}(p) = (Ip - A)^{-1} B\bar{u}(p), \quad (3.1)$$

де  $I$  - одинична матриця розміром  $2 \times 2$ .

За визначенням

$$\bar{y}(p) = W(p)\bar{u}(p). \quad (3.2)$$

Порівнюючи вирази (4.1) і (4.2), приходимо до висновку, що

$$W(p) = (Ip - A)^{-1} B. \quad (3.3)$$

Матричну передавальну функцію (4.3) запишемо у розгорнутому вигляді:

$$\begin{bmatrix} w_{11}(p) & w_{12}(p) \\ w_{21}(p) & w_{22}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & p - a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix}.$$

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки  $\begin{bmatrix} p - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & p - a_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} p - a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & p - a_{11} \end{bmatrix}$ , то

$$\begin{bmatrix} w_{11}(p) & w_{12}(p) \\ w_{21}(p) & w_{22}(p) \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} p - a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & p - a_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

де:  $\Delta(p) = (p - a_{11})(p - a_{22}) - a_{12}a_{21} = p^2 - (a_{11} + a_{22})p + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$ .

Після перемноження матриць, що знаходяться у правій частині матричного рівняння (3.4), отримаємо

$$\begin{bmatrix} w_{11}(p) & w_{12}(p) \\ w_{21}(p) & w_{22}(p) \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} (p - a_{22})b_{11} & +a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} & (p - a_{11})b_{22} \end{bmatrix}.$$

Із останнього співвідношення знаходимо передавальні функції  $w_{ij}(p)$ ,  $i = j = 1, 2$  як відношення  $i$ -го виходу до  $j$ -го входу перетворених за Лапласом при нульових початкових умовах [6,7].

З умови рівності двох матриць випливає, що

$$w_{11}(p) = \frac{b_{11}(p - a_{22})}{\Delta(p)}, \quad w_{12}(p) = \frac{a_{12}b_{22}}{\Delta(p)}, \quad (3.5)$$

$$w_{21}(p) = \frac{a_{21}b_{11}}{\Delta(p)}, \quad w_{22}(p) = \frac{b_{22}(p - a_{11})}{\Delta(p)}. \quad (3.6)$$

Матрично-векторне рівняння (4.2) запишемо у такому вигляді:

$$\begin{bmatrix} y_1(p) \\ y_2(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}(p) & w_{12}(p) \\ w_{21}(p) & w_{22}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(p) \\ u_2(p) \end{bmatrix}.$$

Після перемноження відповідних матриць, отримаємо

$$\begin{bmatrix} y_1(p) \\ y_2(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}(p)u_1(p) + w_{12}(p)u_2(p) \\ w_{21}(p)u_1(p) + w_{22}(p)u_2(p) \end{bmatrix}.$$

Із останнього матричного рівняння знаходимо, що

$$y_1(p) = w_{11}(p)u_1(p) + w_{12}(p)u_2(p), \quad (3.7)$$

$$y_2(p) = w_{21}(p)u_1(p) + w_{22}(p)u_2(p). \quad (3.8)$$

Формули (3.7) і (3.8) дають змогу побудувати структурну схему об'єкта керування, яка зображена на рис. 3.1 [6,7].

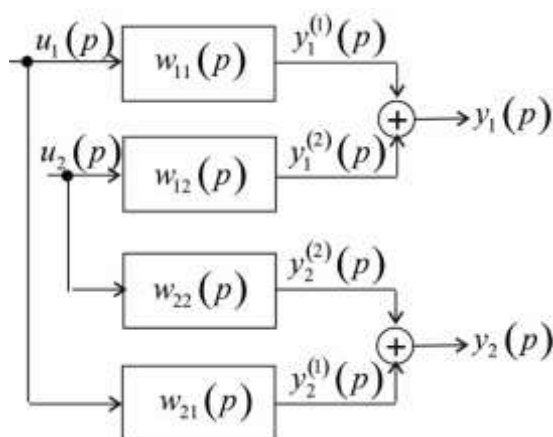


Рисунок 3.1 – Структурна схема багатовимірнього об'єкта

Передавальні функції  $w_{21}(p)$  і  $w_{12}(p)$  мають своїми входами сигнали  $u_1(p)$  і  $u_2(p)$ , а виходами –  $y_2^{(2)}(p)$  і  $y_1^{(2)}(p)$ . Ці вихідні сигнали додаються до сигналів  $y_2^{(1)}(p)$  і  $y_1^{(1)}(p)$ . У результаті на виході об'єкта отримуємо сигнали  $y_2(p)$  і  $y_1(p)$  [6,7].

Таким чином, передавальні функції  $w_{21}(p)$  і  $w_{12}(p)$  разом із своїми каналами передачі сигналів утворюють перехресні зв'язки об'єкта керування. Наявність перехресних зв'язків значно погіршує якість процесу керування, оскільки через такі перехресні зв'язки відбувається взаємовплив керуючої дії  $u_1$  на вихідну величину  $y_2$  і, навпаки, керуюча дія  $u_2$  впливає на  $y_1$ .

Якість процесу керування можна значно покращити, якщо певним чином компенсувати перехресні зв'язки. Одним із методів такої компенсації є синтез автономної системи керування [6,7].

Схема автоматичного керування, до складу якої входить ряд окремих контурів разом з компенсатором перехресних зв'язків, показана на рис. 3.2.

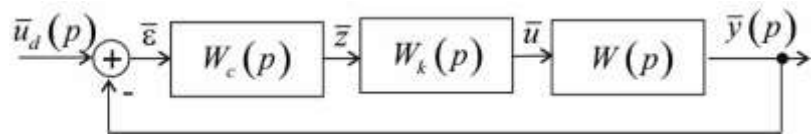


Рисунок 3.2 – Структурна схема автономної системи керування

Матрична передавальна функція регулятора  $W_c(p)$  є діагональною матрицею з передавальними функціями  $w_{11}^{(c)}(p)$  і  $w_{22}^{(c)}(p)$ . Матричну передаточну функцію компенсатора позначимо як  $W_k(p)$  [6,7].

Знайдемо матричну передавальну функцію автономної системи керування, яка зображена на рис. 3.2.

Як із рис. 3.2 випливає така система матрично-векторних рівнянь:

$$\begin{aligned} \bar{z} &= W_c(p)\bar{\varepsilon}, \\ \bar{u} &= W_k(p)\bar{z}, \\ \bar{y} &= W(p)\bar{u}, \\ \bar{\varepsilon} &= \bar{u}_d - \bar{y}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де  $\bar{u}_d$  – вектор-завдання для багатовимірного регулятора з передавальною функцією  $W_c(p)$ .

Виключаючи проміжні змінні із системи рівнянь (4.9), крім вектор-вхідної і вектор-вихідної величин  $\bar{u}_d$  і  $\bar{y}$ , отримаємо

$$\bar{y}(p) = (I + W_{os}(p))^{-1} W_{os}(p) \bar{u}_d(p), \quad (3.10)$$

де  $W_{os}(p) = W(p)W_k(p)W_c(p)$  – матрична передавальна функція розімкненої багатовимірної системи.

Допустимо, що елементи матриці  $W_k(p)$  вибрані такими, що матриця  $W_{pr}(p) = (I + W_{os}(p))^{-1} W_{os}(p)$  діагональна.

У такому випадку

$$\bar{y} = W_{pr}(p)\bar{u}_d,$$

або

$$\begin{bmatrix} y_1(p) \\ y_2(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}^{(os)}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}^{(os)}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{d,1}(p) \\ u_{d,2}(p) \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Виконавши операцію множення у правій частині векторно-матричного рівняння (4.11), отримаємо

$$\begin{aligned} y_1(p) &= w_{11}^{(os)}(p)u_{d,1}(p), \\ y_2(p) &= w_{22}^{(os)}(p)u_{d,2}(p). \end{aligned}$$

Отже, у випадку діагональної матриці  $W_{os}(p)$  система автоматичного керування (рис. 3.2) стає автономною за кожним виходом  $y_1(p)$  і  $y_2(p)$  по відношенню до завдань  $u_{d,1}(p)$  і  $u_{d,2}(p)$  [6,7].

Оскільки  $I$  одинична матриця, а  $W_c(p)$  діагональна матриця, то матриця  $W_{os}(p)$  буде діагональною за такої умови:

$$W(p)W_k(p) = \text{diag}W(p), \quad (3.12)$$

де матриця, яка утворена із матриці  $W(p)$  шляхом обнуління всіх поза діагональних елементів.

Із рівняння (3.12) знаходимо матричну передавальну функцію компенсатора

$$W_k(p) = W^{-1}(p)\text{diag}W(p).$$

Знайдемо матричну передавальну функцію компенсатора для двовимірного об'єкта керування. Маємо

$$\begin{bmatrix} w_{11}^{(k)}(p) & w_{12}^{(k)}(p) \\ w_{21}^{(k)}(p) & w_{22}^{(k)}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}(p) & w_{12}(p) \\ w_{21}(p) & w_{22}(p) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} w_{11}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}(p) \end{bmatrix}.$$

Оскільки  $\begin{bmatrix} w_{11}(p) & w_{12}(p) \\ w_{21}(p) & w_{22}(p) \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\Delta_k(p)} \begin{bmatrix} w_{22}(p) & -w_{12}(p) \\ -w_{21}(p) & w_{11}(p) \end{bmatrix}$ , то

$$\begin{bmatrix} w_{11}^{(k)}(p) & w_{12}^{(k)}(p) \\ w_{21}^{(k)}(p) & w_{22}^{(k)}(p) \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta_k(p)} \begin{bmatrix} w_{11}(p)w_{22}(p) & -w_{12}(p)w_{22}(p) \\ -w_{11}(p)w_{21}(p) & w_{11}(p)w_{22}(p) \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

де  $\Delta_k(p) = w_{11}(p)w_{22}(p) - w_{12}(p)w_{21}(p)$ .

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Із матричного рівняння (3.13) визначимо передавальні функції за окремими контурами компенсатора [6,7]

$$w_{11}^{(k)}(p) = w_{22}^{(k)}(p) = \frac{w_{11}(p)w_{22}(p)}{\Delta_k(p)},$$

$$w_{12}^{(k)}(p) = -\frac{w_{12}(p)w_{22}(p)}{\Delta_k(p)},$$

$$w_{21}^{(k)}(p) = -\frac{w_{21}(p)w_{11}(p)}{\Delta_k(p)}.$$

На рис. 3.3 зображена розгорнута структура автономної системи керування двовимірним об'єктом [6,7].

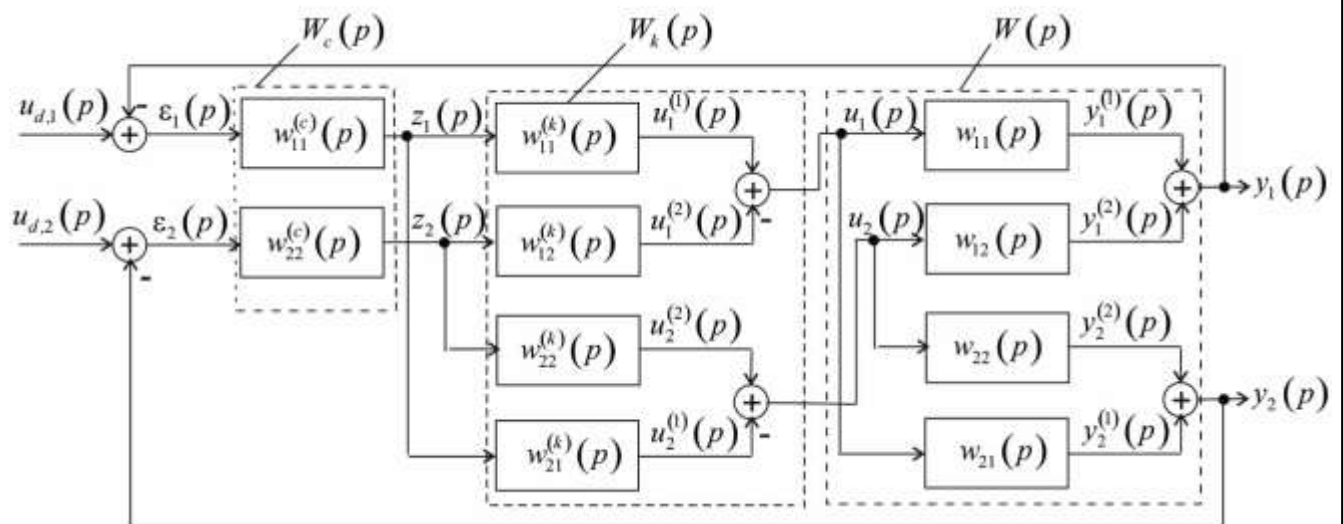


Рисунок 3.3 – Структурна схема автономної системи керування двовимірним об'єктом

Знайдемо зображення вихідних величин автономної системи автоматичного керування, враховуючи рівність (3.12). Тоді рівняння (3.10) набуде такого вигляду:

$$\bar{y}(p) = (I + \text{diag} W(p)W_c(p))^{-1} \text{diag} W(p)W_c(p)\bar{u}_d(p). \quad (3.14)$$

У кожний ланцюг керування (рис. 4.3) включені одновимірні регулятори з

передавальними функціями  $w_{11}^{(c)}(p)$  і  $w_{22}^{(c)}(p)$ . Тому  $W_c(p) = \begin{bmatrix} w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix}$ .

З врахуванням матриць  $\text{diag}W(p)$  і  $W_c(p)$  рівняння (3.14) запишемо у такому розгорнутому вигляді:

$$\begin{bmatrix} y_1(p) \\ y_2(p) \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{11}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix} \right)^{-1} \times \\ \times \begin{bmatrix} w_{11}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d,1}(p) \\ u_{d,2}(p) \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Виконаємо спочатку дії над матрицями, що знаходяться в дужках, у правій частині рівняння (3.15) [6,7]. Маємо

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{11}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} 1 + w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & 1 + w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix}.$$

Якщо  $A$  діагональна матриця розміром  $2 \times 2$ , то  $A^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & a_{22}^{-1} \end{bmatrix}$ . Отже,

$$\begin{bmatrix} 1 + w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & 1 + w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix}^{-1} = \\ = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p)} \end{bmatrix}.$$

Крім того

$$\begin{bmatrix} w_{11}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix}.$$

З врахуванням отриманих результатів рівняння (3.15) набуде такого

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

вигляду:

$$\begin{bmatrix} y_1(p) \\ y_2(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p)} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p) & 0 \\ 0 & w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d,1}(p) \\ u_{d,2}(p) \end{bmatrix}.$$

Із останнього матричного рівняння випливає, що

$$y_1(p) = \frac{w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p)}{1 + w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p)} u_{d,1}(p), \quad (3.16)$$

$$y_2(p) = \frac{w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p)}{1 + w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p)} u_{d,2}(p). \quad (3.17)$$

Таким чином, синтезований компенсатор з передавальною функцією (3.13) компенсує перехресні зв'язки об'єкта керування і двовимірна система керування розпадається на дві незалежні (автономні) системи з такими передавальними функціями [6,7]:

$$W_1(p) = \frac{w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p)}{1 + w_{11}(p)w_{11}^{(c)}(p)}, \quad (3.18)$$

$$W_2(p) = \frac{w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p)}{1 + w_{22}(p)w_{22}^{(c)}(p)}. \quad (3.19)$$

Для синтезу автономної системи керування з передавальними функціями (4.18) і (4.19), для вибраного закону керування, необхідно визначити параметри налаштування регуляторів, визначити стійкість системи, та оцінити її якість керування за кожними контуром керування [6,7].

### 3.2. Визначення параметрів налаштування регуляторів

Після того як визначена структура автоматичної системи керування гідравлічним об'єктом задачею синтезу є визначання параметрів налаштування

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

певного типу регулятора.

Вибором параметрів налаштування регуляторів можна досягти такого розміщення нулів і полюсів передавальної функції на  $p$ - площині, щоб досягти бажаної якості керування.

Допустимо, що в першій і другий контури керування включені ПІ-регулятори. Тоді

$$w_{11}^{(c)}(p) = \frac{C_0^{(1)} + C_1^{(1)}p}{p}, \quad (3.20)$$

$$w_{22}^{(c)}(p) = \frac{C_0^{(2)} + C_1^{(2)}p}{p}, \quad (3.21)$$

де  $C_0^{(i)}, C_1^{(i)}, i=1,2$  - параметри налаштування регуляторів.

Підставляючи значення  $w_{11}^{(c)}(p)$  і  $w_{22}^{(c)}(p)$  у вирази (3.16) і (3.17), отримаємо

$$W_1(p) = \frac{w_{11}(p)(C_0^{(1)} + C_1^{(1)}p)}{p + w_{11}(p)(C_0^{(1)} + C_1^{(1)}p)}, \quad (3.22)$$

$$W_2(p) = \frac{w_{22}(p)(C_0^{(2)} + C_1^{(2)}p)}{p + w_{22}(p)(C_0^{(2)} + C_1^{(2)}p)}. \quad (3.23)$$

Знайдемо передавальні функції кожного контуру замкненої системи керування за умови, що матрична передавальна функція задана формулою (3.3),

в якій  $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$  і  $B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix}$ . Тоді із формул (3.5) і (3.6) випливає, що

$$w_{11}(p) = \frac{b_{11}(p - a_{22})}{\Delta(p)}, \quad (3.5)$$

$$w_{22}(p) = \frac{b_{22}(p - a_{11})}{\Delta(p)}. \quad (3.6)$$

З врахуванням значень  $w_{11}(p)$  і  $w_{22}(p)$  формули (3.22) і (3.23) будуть такими:

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$$W_1(p) = \frac{b_{11}(p - a_{22})(C_0^{(1)} + C_1^{(1)}p)}{p\Delta(p) + b_{11}(p - a_{22})(C_0^{(1)} + C_1^{(1)}p)},$$

$$W_2(p) = \frac{b_{22}(p - a_{11})(C_0^{(2)} + C_1^{(2)}p)}{p\Delta(p) + b_{22}(p - a_{11})(C_0^{(2)} + C_1^{(2)}p)}.$$

Оскільки  $\Delta(p) = p^2 - (a_{11} + a_{22})p + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$ , то

$$W_1(p) = \frac{C_1^{(1)}b_{11}p^2 + b_{11}(C_0^{(1)} - C_1^{(1)}a_{22})p - C_0^{(1)}b_{11}a_{22}}{p^3 + (C_1^{(1)}b_{11} + \alpha_1)p^2 + (C_0^{(1)}b_{11} - C_1^{(1)}b_{11}a_{22} + \alpha_2)p - C_0^{(1)}b_{11}a_{22}}, \quad (4.24)$$

$$W_2(p) = \frac{C_1^{(2)}b_{22}p^2 + (C_0^{(2)}b_{22} - C_1^{(2)}b_{22}a_{11})p - C_0^{(2)}b_{22}a_{11}}{p^3 + (C_1^{(2)}b_{22} + \alpha_1)p^2 + (C_0^{(2)}b_{22} - C_1^{(2)}b_{22}a_{11} + \alpha_2)p - C_0^{(2)}b_{22}a_{11}}. \quad (4.25)$$

де  $\alpha_1 = -(a_{11} + a_{22})$ ,  $\alpha_2 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$ .

Для вибору параметрів налаштування  $C_0^{(i)}$ ,  $C_1^{(i)}$ ,  $i = 1, 2$  регуляторів скористаємося методом розміщення полюсів [6,7].

Відомо, що стійкість і якість системи керування визначається розміщенням полюсів на комплексній  $p$ - площині. Для того щоб система керування була стійкою необхідно щоб всі полюси передавальної функції  $W_1(p)$  або  $W_2(p)$  були б розміщені у лівій напівплощині комплексної  $p$ - площини. Якість перехідного процесу в системі зумовлена двома величинами – ступенем стійкості  $\eta$  і коливністю  $\mu$  [6,7].

Оскільки характеристичне рівняння передавальної функції (3.24) або (3.25) є поліномом третьої степені відносно змінної  $p$ , то він матиме три корені. Ступень стійкості визначає дійсний корінь, який є ближнім до уявної осі. Позначимо його як  $p_3 = -\eta$ . Інші два корені  $s_1$  і  $s_2$  можуть бути дійсними або комплексно-спряженими. Розглянемо більш загальний випадок, коли  $p_1 = -\beta + j\zeta$  і  $p_2 = -\beta - j\zeta$ . Відношення уявної частини кореня до його дійсної частини носить назву ступені коливання системи, тобто  $\mu = \frac{\zeta}{\beta}$  [6,7].

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Параметри налаштування ПІ-регулятора  $C_0^{(i)}, C_1^{(i)}, i=1,2$  виберемо так, щоб корені характеристичних поліномів передавальних функцій (3.24) і (3.25) знаходились в заданих точках на  $p$ - площині [6,7].

Розглянемо поліноми

$$\Delta_q^{(i)}(p) = p^3 + \delta_1^{(i)} p^2 + \delta_2^{(i)} p + \delta_3^{(i)}, i=1,2. \quad (3.26)$$

Нехай  $\Delta_i(p), i=1,2$  характеристичні поліноми передавальних функцій (3.24) і (3.25). Будемо вимагати, щоб виконувалась умова

$$\Delta_q^{(i)}(p) = \Delta_i(p), i=1,2. \quad (3.27)$$

Коефіцієнти полінома (3.26)  $\delta_j^{(i)}, i=1,2, j=1,2,3$  виберемо так, щоб його корені лежали в заданих точках на  $p$ - площині [6,7].

Враховуючи умову (3.27), будемо мати для  $i=1$

$$\begin{aligned} p^3 + (C_1^{(1)} b_{11} + \alpha_1) p^2 + (C_0^{(1)} b_{11} - C_1^{(1)} b_{11} a_{22} + \alpha_2) p - C_0^{(1)} b_{11} a_{22} = \\ = p^3 + \delta_1^{(1)} p^2 + \delta_2^{(1)} p + \delta_3^{(1)}. \end{aligned}$$

Прирівнюючи коефіцієнти при однакових степенях, приходимо до висновку, що

$$b_{11} C_1^{(1)} + \alpha_1 = \delta_1^{(1)}, \quad (3.28)$$

$$C_0^{(1)} b_{11} - C_1^{(1)} b_{11} a_{22} + \alpha_2 = \delta_2^{(1)}, \quad (3.29)$$

$$-C_0^{(1)} b_{11} a_{22} = \delta_3^{(1)}. \quad (3.30)$$

Отримана система із трьох рівнянь вміщує тільки два невідомих  $C_0^{(1)}$  і  $C_1^{(1)}$ .

Це означає, що тільки два корені рівняння  $\Delta_q^{(1)}(p)=0$  можна вибрати так, щоб вони знаходились у заданих точках на  $p$ - площині. Нехай це будуть корені  $p_1^{(1)}$  і  $p_2^{(1)}$  [6,7].

Із рівняння (3.30) визначимо, що

$$C_0^{(1)} = -\frac{\delta_3^{(1)}}{b_{11} a_{22}}, \quad (3.31)$$

а із рівняння (3.28) знаходимо

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_1^{(1)} = \frac{\delta_1^{(1)} - \alpha_1}{b_{11}}. \quad (3.32)$$

У відповідності з узагальненою теоремою Вієте між коренями полінома (3.26) існують такі співвідношення:

$$p_1^{(1)} + p_2^{(1)} + p_3^{(1)} = -\delta_1^{(1)}, \quad (3.33)$$

$$p_1^{(1)} p_2^{(1)} + p_1^{(1)} p_3^{(1)} + p_2^{(1)} p_3^{(1)} = \delta_2^{(1)}, \quad (3.34)$$

$$p_1^{(1)} p_2^{(1)} p_3^{(1)} = -\delta_3^{(1)}. \quad (3.35)$$

Значення  $C_0^{(1)}$  і  $C_1^{(1)}$ , які визначаються виразами (3.31) і (3.32), підставимо в (3.29) [6,7]. У результаті отримаємо

$$(\delta_1^{(1)} - \alpha_1)\lambda_{11} + \lambda_{12}\delta_3^{(1)} + \alpha_2 = \delta_2^{(1)}, \quad (3.36)$$

де  $\lambda_{11} = -a_{22}$ ,  $\lambda_{12} = -\frac{1}{a_{22}}$ .

Оскільки  $p_1^{(1)} = -\beta_1 + j\zeta_1$  і  $p_2^{(1)} = -\beta_1 - j\zeta_1$ , а  $p_3^{(1)} = -\eta_1$ , то система рівнянь (3.33) – (3.35) буде такою:

$$\delta_1^{(1)} = 2\beta_1 + \eta_1, \quad (3.37)$$

$$\delta_2^{(1)} = \beta_1^2(1 + \mu_1^2) + 2\beta_1\eta_1, \quad (3.38)$$

$$\delta_3^{(1)} = \beta_1^2(1 + \mu_1^2)\eta_1. \quad (3.39)$$

Замінюючи  $\delta_j^{(1)}$ ,  $j = \overline{1,3}$  у виразі (3.36) значенням, що визначаються формулами (3.37) – (3.39), приходимо до такого результату [6,7]:

Із останнього рівняння визначимо ступень стійкості  $\eta_1$  першого контуру системи автоматичного керування

$$\eta_1 = \frac{\beta_1^2(1 + \mu_1^2) - (2\beta_1 - \alpha_1)\lambda_{11} - \alpha_2}{\lambda_{11} + \lambda_{12}\beta_1^2(1 + \mu_1^2) - 2\beta_1}. \quad (3.40)$$

Передавальні функції (3.24) і (3.25) мають однакові структури, тому результати, які отримані для першого контуру керування можна поширити і на другий контур керування [6,7].

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Отже, маємо таку рівність:

$$p^3 + (C_1^{(2)}b_{22} + \alpha_1)p^2 + (C_0^{(2)}b_{22} - C_1^{(2)}b_{22}a_{11} + \alpha_2)p - C_0^{(2)}b_{22}a_{11} = \\ = p^3 + \delta_1^{(2)}p^2 + \delta_2^{(2)}p + \delta_3^{(2)}.$$

З останнього співвідношення отримаємо таку систему рівнянь:

$$C_1^{(2)}b_{22} + \alpha_1 = \delta_1^{(2)}, \\ C_0^{(2)}b_{22} + C_1^{(2)}(a_{21}b_{12} - b_{22}a_{11}) + \alpha_2 = \delta_2^{(2)}, \\ C_0^{(2)}(a_{21}b_{12} - b_{22}a_{11}) = \delta_3^{(2)}.$$

З останньої системи рівнянь знаходимо параметри налаштування ПП-регулятора другого контуру автономної системи керування [6,7]:

$$C_0^{(2)} = -\frac{\delta_3^{(2)}}{b_{22}a_{11}}, \quad (3.41)$$

$$C_1^{(2)} = \frac{\delta_1^{(2)} - \alpha_1}{b_{22}}. \quad (3.42)$$

Значення величин  $\delta_1^{(2)}$  і  $\delta_3^{(2)}$  знаходимо за формулами, які аналогічні виразам (3.37) – (4.39)

$$\delta_1^{(2)} = 2\beta_2 + \eta_2, \quad (3.43)$$

$$\delta_2^{(2)} = \beta_2^2(1 + \mu_2^2) + 2\beta_2\eta_2$$

$$\delta_3^{(2)} = \beta_2^2(1 + \mu_2^2)\eta_2, \quad (3.44)$$

де

$$\eta_2 = \frac{\beta_2^2(1 + \mu_2^2) - (2\beta_2 - \alpha_1)\lambda_{21} - \alpha_2}{\lambda_{21} + \lambda_{22}\beta_2^2(1 + \mu_2^2) - 2\beta_2}, \quad \lambda_{21} = -a_{11}, \quad \lambda_{22} = -\frac{1}{a_{11}}. \quad (3.45)$$

Після того, як певним чином вибрані значення величин  $\beta_1$  ( $\beta_2$ ) і  $\mu_1 = \frac{\zeta_1}{\beta_1}$

$\left(\mu_2 = \frac{\zeta_2}{\beta_2}\right)$ , за формулою (3.40) (і відповідно за формулою (3.45)) слід визначити

ступінь стійкості  $\eta_1$  ( $\eta_2$ )[6,7]. Потім необхідно обчислити значення  $\delta_1^{(1)}$  ( $\delta_1^{(2)}$ ) і  $\delta_3^{(1)}$  ( $\delta_3^{(2)}$ ), використавши співвідношення (3.37) і (3.39) (або аналогічні формули (3.43)

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і (3.44)), що дає змогу визначити параметри налаштування ПІ-регулятора за формулами (3.31) і (3.32) (чи за формулами (3.41) і (3.42)).

### 3.3 Розрахунок параметрів налаштування регуляторів

Обчислимо параметри налаштування ПІ-регулятора для першого і другого контурів автономної системи автоматичного керування. Для цього виберемо такі значення величин [6,7].

Для першого контуру:

- значення дійсної частини комплексно-спряженого кореня (за модулем) -  $\beta_1 = 0,5$ ;
- ступінь коливання системи -  $\mu_1 = 0,7$ .

Для другого контуру :

- значення дійсної частини комплексно-спряженого кореня (за модулем) -  $\beta_2 = 0,8$ ;
- ступінь коливання системи -  $\mu_2 = 0,9$ .

Розрахунок параметрів налаштування ПІ-регуляторів для першого і другого контурів автономної системи здійснюємо за таким алгоритмом [6,7]:

*Крок 1.* Визначаємо ступінь стійкості першого і другого контурів автономної системи за формулами (3.40) і (3.45).

*Крок 2.* Обчислюємо значення величин  $\delta_1^{(1)}$  і  $\delta_3^{(1)}$  для першого контуру за формулами (3.37) і (3.38) та  $\delta_1^{(2)}$  і  $\delta_3^{(2)}$  - за формулами (3.43) і (3.44).

*Крок 3.* За формулам (3.31) і (3.32) обчислюємо параметри налаштування ПІ-регулятора для першого контуру та за формулами (3.41) і (3.42) – для другого контуру.

*Крок 4.* Перевіряємо синтезовану систему на стійкість, використовуючи умови (3.46) і (3.47).

### 3.4 Оцінка стійкості автономної системи автоматичного керування

При проектуванні системи автоматичного керування неодмінною вимогою

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

її успішного функціонування є вимога стійкості системи.

Оскільки автономна система автоматичного керування розпадається на два незалежні контури, кожний із яких характеризується своєю передавальною функцією, то стійкість кожного контуру системи будемо оцінювати окремо. Для оцінки стійкості кожного контуру системи виберемо критерій Рауса-Гурвіца.

У відповідності з цим критерієм лінійна система (у нашому випадку третього порядку) буде стійкою, якщо виконуються такі умови [6,7]:

- всі коефіцієнти характеристичного рівняння додатні;
- різниця добутків середніх і крайніх членів більша за нуль.

Запишемо характеристичні рівняння для першого і другого контурів автономної системи керування.

. Прирівнюючи у формулах (3.24) і (3.25) знаменники до нуля, отримаємо

- для першого контуру

$$p^3 + (C_1^{(1)}b_{11} + \alpha_1)p^2 + (C_0^{(1)}b_{11} - C_1^{(1)}b_{11}a_{22} + \alpha_2)p - C_0^{(1)}b_{11}a_{22} = 0;$$

- для другого контуру

$$p^3 + (C_1^{(2)}b_{22} + \alpha_1)p^2 + (C_0^{(2)}b_{22} - C_1^{(2)}b_{22}a_{11} + \alpha_2)p - C_0^{(2)}b_{22}a_{11} = 0.$$

Введемо такі позначення:

$$A_1^{(1)} = C_1^{(2)}b_{22} + \alpha_1, A_2^{(1)} = C_0^{(1)}b_{11} + C_1^{(1)}b_{11}a_{22} + \alpha_2, A_3^{(1)} = -C_0^{(1)}b_{11}a_{22};$$

$$A_1^{(2)} = C_1^{(2)}b_{22} + \alpha_1, A_2^{(2)} = C_0^{(2)}b_{22} - C_1^{(2)}b_{22}a_{11} + \alpha_2, A_3^{(2)} = -C_0^{(2)}b_{22}a_{11}.$$

Отже, для стійкості автономної двохвимірної системи автоматичного керування необхідно і достатньо виконання таких умов [6,7]:

- для першого контуру керування

$$A_1^{(1)} > 0, A_2^{(1)} > 0, A_3^{(1)} > 0;$$

$$A_1^{(1)}A_2^{(1)} - A_3^{(1)} > 0; \quad (3.46)$$

- для другого контуру керування

$$A_1^{(2)} > 0, A_2^{(2)} > 0, A_3^{(2)} > 0;$$

$$A_1^{(2)}A_2^{(2)} - A_3^{(2)} > 0; \quad (3.47)$$

Таким чином, одночасне виконання двох сформованих умов як для

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

першого, так і для другого контурів гарантує стійкість автономної системи керування в цілому відносно впливів завдання.

### 3.5 Оцінка якості процесу керування

Після того як встановлено, що синтезована система автоматичного керування стійка, наступним етапом в процесі проектування є оцінка якості її функціонування [6,7].

Як правило, наперед невідомо, якими в реальних умовах будуть вхідні сигнали, тому для оцінки і співставлення різних варіантів систем, що проектуються, вибирають тестові вхідні сигнали.

Як тестовий виберемо стрибкоподібний вхідний сигнал, який характеризується такою залежністю:

$$u_d(t) = \begin{cases} G & \text{при } t \geq 0, \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (3.48)$$

Основними показниками, які характеризують якість процесу керування, є перерегулювання і час регулювання, значення яких визначають за перехідною характеристикою системи (рис. 3.4).

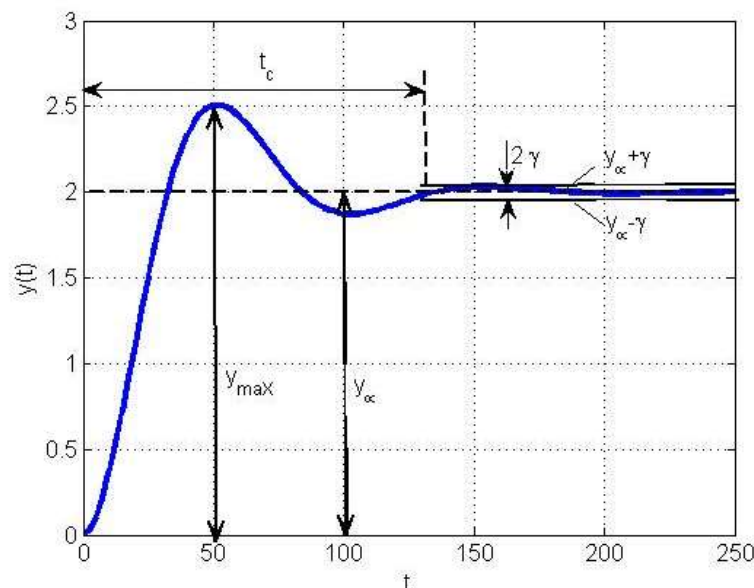


Рисунок 3.4 – Зміна вихідної величини в часі

Перерегулювання визначають як відносне максимальне відхилення

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

вихідної величини системи, виражене у відсотках, при подачі на її вхід стрибкоподібної вхідної величини (4.48).

$$\sigma = \frac{y_{max}(t) - y_{\infty}}{y_{\infty}} \cdot 100\% . \quad (3.49)$$

Час регулювання  $t_c$  визначається моментом часу, після якого вихідна величина залишається всередині смуги шириною не більше ніж  $\pm\gamma\%$  від  $y_{\infty}$  (рис. 3.4).

### 3.6 Програмне забезпечення автономної системи регулювання

У процесі синтезу та дослідження автономної системи автоматичного керування суттєву роль відіграє програмне забезпечення, яке автоматизує обчислення параметрів регуляторів, аналіз стійкості системи, побудову графіків перехідних процесів та оцінювання динамічних характеристик [6,7].

Розроблена програма (Додаток Б), реалізує весь цикл обчислень, необхідних для функціонального аналізу системи. Алгоритм програми передбачає автоматичне визначення коефіцієнтів передавальних функцій компенсатора на основі заданих характеристик системи. Далі здійснюється розрахунок параметрів ПІ-регулятора з урахуванням методу розміщення полюсів, що забезпечує досягнення заданої динаміки в кожному контурі керування [6,7].

У середовищі Matlab реалізовано побудову графіків перехідних процесів для кожного з контурів автономної системи автоматичного керування. За допомогою цього інструмента здійснюється візуалізація динамічної відповіді системи на одиничний стрибкоподібний сигнал на вході [6,7].

Зокрема, для першого контуру, використовуючи відповідну передавальну функцію, формується графік зміни вихідної величини в часі, який зображено на рис. 3.6. Цей графік дозволяє оцінити характер переходу системи до усталеного стану, наявність коливань, перерегулювання та швидкодію [6,7].

Аналогічно, для другого контуру побудовано перехідний процес, що

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

представлено на рис. 3.6. Завдяки програмному модулю, здійснено чисельне моделювання динаміки, яке дозволяє наочно проаналізувати відповідь системи у часі (Додаток В).

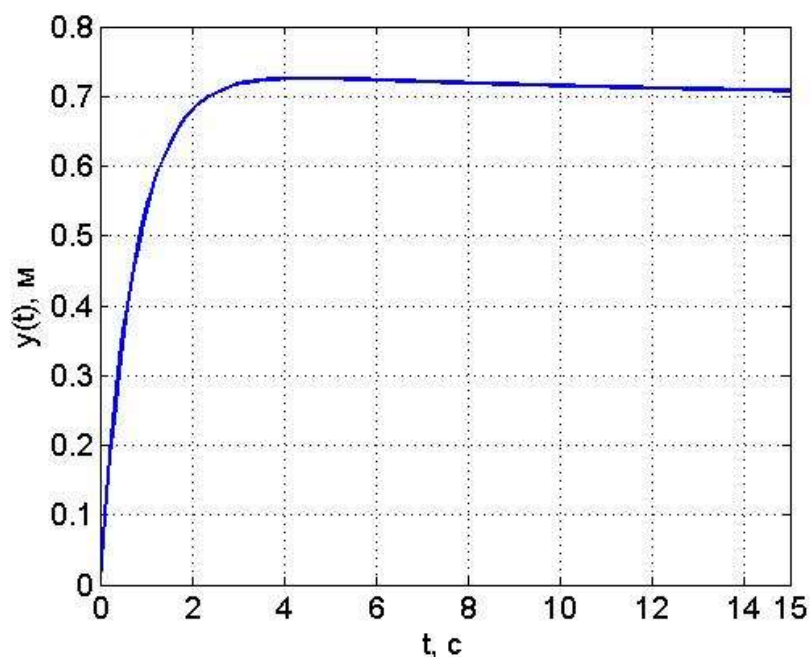


Рисунок 3.5 – Перехідна характеристика автономної системи за першим контуром

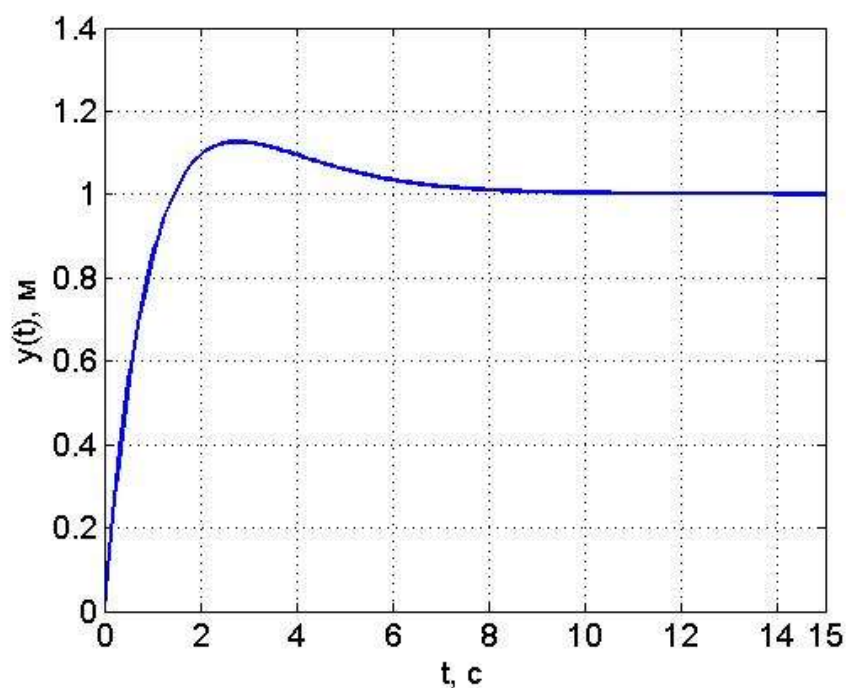


Рисунок 3.6 – Перехідна характеристика автономної системи за другим контуром

Автономна система автоматичного керування відтворює незалежно за кожним контуром значення величин завдань  $u_{d,1} = 0,7 \text{ м}$  і  $u_{d,2} = 1,0 \text{ м}$ .

Значення перерегулювання обчислювалось за формулою (4.49). Визначення часу регулювання здійснювалось при значенні  $\gamma = 0,01$  або  $\gamma = 1\%$ .

Таким чином, синтезована автономна система автоматичного керування гідравлічним об'єктом у перехідному процесі, який зумовлений стрибкоподібною зміною сигналів завдання, забезпечує перерегулювання - за першим контуром  $\sigma_1 = 2,45\%$  і  $\sigma_2 = 12,48\%$  - за другим контуром [6,7].

При цьому час регулювання для першого контуру становить  $t_{c,1} = 14,02 \text{ с}$ , а для другого контуру -  $t_{c,2} = 12,15 \text{ с}$ .

### **Висновки до розділу**

У третьому розділі було здійснено повний цикл синтезу і налаштування автономної системи автоматичного керування гідравлічним об'єктом, що складається з двох взаємопов'язаних контурів. Розраховано параметри П-регуляторів для кожного контуру з урахуванням бажаних характеристик динаміки, таких як ступінь коливання та значення дійсної частини комплексно-спряжених коренів, що забезпечило керованість і передбачувану поведінку системи.

На основі характеристичних рівнянь контурів, отриманих з передавальних функцій, було перевірено виконання умов стійкості за критерієм Рауса-Гурвіца. Доведено, що при належному виборі параметрів регуляторів система задовольняє вимоги стійкості в кожному з незалежних контурів, а отже, й у системі загалом.

У процесі оцінки якості регулювання були використані типові тестові дії у вигляді стрибкоподібного сигналу. Визначено перерегулювання та час регулювання для кожного з контурів, що дозволило здійснити кількісну оцінку ефективності керування. Результати свідчать про те, що синтезована система забезпечує адекватну якість регулювання як за швидкодією, так і за точністю.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За допомогою програмної реалізації в середовищі MATLAB автоматизовано процеси обчислення параметрів, побудови графіків перехідних процесів та аналізу їх характеристик. Отримані результати підтверджують працездатність синтезованої системи керування в умовах стрибкоподібної зміни сигналів завдання та її здатність до стабілізації заданих параметрів у кожному з контурів.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК РЕЗЕРВУАРАМИ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ

### 4.1 Дослідження ієрархії системи контролю і керування

У сучасних умовах функціонування резервуарних парків, призначених для тривалого зберігання нафтопродуктів, особливої значущості набуває впровадження автоматизованих систем керування, що базуються на мікропроцесорних технологіях. Така система має забезпечувати не лише безперервний моніторинг та управління виробничими процесами, а й реалізацію алгоритмів захисту, сигналізації та адаптивної реакції на зміну технічного стану об'єктів. Мікропроцесорна система автоматики відіграє роль інтегратора, що об'єднує функціональну частину управління з інструментальними засобами аналізу технологічних параметрів, забезпечуючи стабільність технологічного середовища, своєчасне реагування на відхилення та зниження залежності від людського фактора.

Завдяки гнучкості програмного ядра й ієрархічній архітектурі, система автоматизації резервуарного парку здатна охоплювати весь спектр задач, пов'язаних із прийомом, накопиченням, зберіганням і подальшою видачею нафтопродуктів. Контрольні функції реалізуються шляхом постійного зчитування параметрів технологічного середовища, таких як тиск, температура, рівень рідини, а також технічного стану засувки, насосних агрегатів та інших виконавчих механізмів. Паралельно із цим система забезпечує захист на основі вбудованих алгоритмів аварійного реагування, включаючи блокування подальших дій, індикацію загрозливого стану та інформування оператора про необхідність втручання або переведення об'єкта в інший режим експлуатації.

Архітектурно система побудована за ієрархічною моделлю, яка передбачає функціональне розділення на три рівні: сенсорний (польовий), рівень локального контролю і рівень візуалізації та диспетчеризації. На нижньому рівні відбувається первинна взаємодія з об'єктом через сенсорні елементи та виконавчі

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

механізми. Усі сигнали передаються на контролерні пристрої, розташовані на середньому рівні, де здійснюється первинна обробка інформації, фільтрація, реалізація логіки управління та формування команд впливу. Застосування контролерів серії Quantum дозволяє досягнути високої швидкодії та стійкості до збоїв, у тому числі завдяки реалізації архітектури з гарячим резервуванням центрального процесора (рис. 4.1).

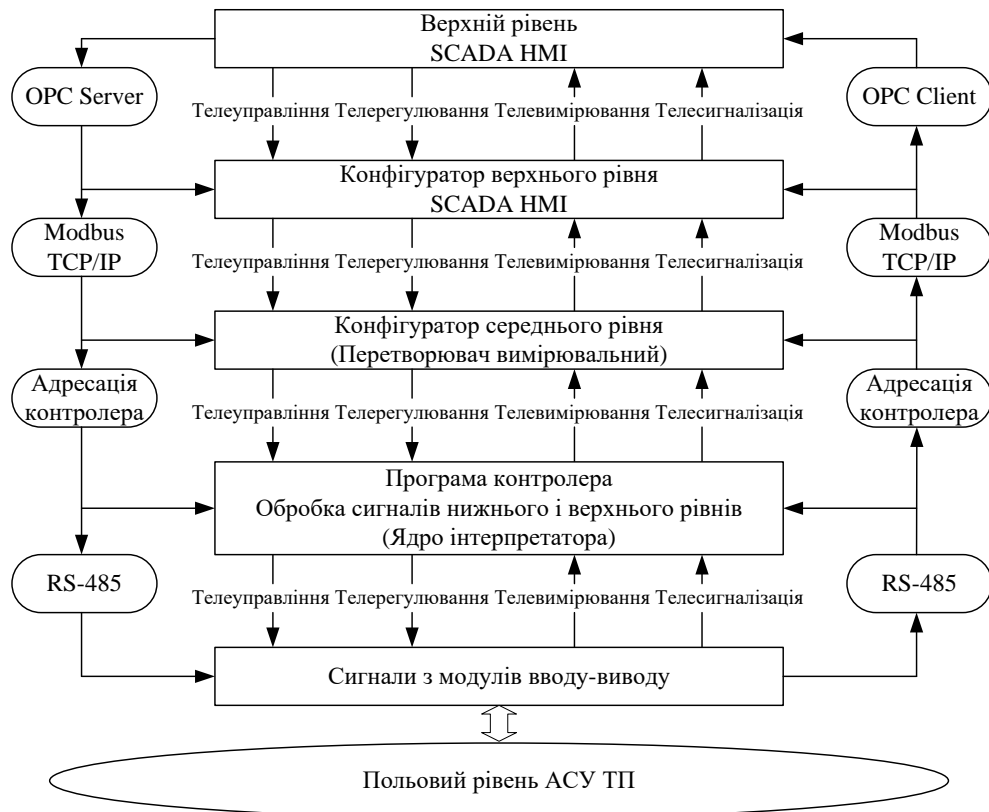


Рисунок 4.1 - Ієрархічна модель АСУ ТП резервуарного парку

Зв'язок між окремими частинами системи здійснюється за допомогою промислових мереж, таких як RIO та Ethernet, що гарантує безперебійну комунікацію між периферійними й центральними пристроями керування. На рівні візуалізації інтегруються автоматизовані робочі місця, які функціонують у середовищі офісної обчислювальної техніки, але адаптовані до вимог технологічного середовища завдяки відповідному програмному забезпеченню. Основні функції цього рівня полягають у відображенні оперативної інформації,

веденні баз даних, архівації подій та реалізації функцій інвентаризації. Особливу увагу приділено безперервності роботи: робочі станції дублюються, а живлення забезпечується від стабілізованого джерела безперебійного живлення, що дає змогу уникнути втрати даних та виходу з ладу при знеструмленні.

Технічні засоби верхнього рівня інтегруються з іншими підсистемами, такими як протипожежна система або система вимірювання рівня, за допомогою стандартних промислових протоколів, зокрема Modbus, ModbusPlus і протоколів, що відповідають міжнародному стандарту IEC 61158. Завдяки цьому забезпечується міжсистемна сумісність та розширюваність архітектури. Також важливою особливістю є синхронізація часових міток між усіма компонентами системи, що забезпечує цілісність історичних даних і точність діагностування подій.

Програмне забезпечення виконує низку завдань, пов'язаних з логічною обробкою сигналів, візуалізацією технологічних процесів, накопиченням даних та взаємодією з оператором. Архітектура програмного середовища має модульну структуру, що забезпечує як централізоване, так і розподілене керування, а також можливість масштабування системи без її зупинки. Програмне середовище передбачає можливість імітації сигналів під час профілактичного обслуговування, що дозволяє проводити тестування захисних алгоритмів без залучення реального об'єкта. Усі програмні модулі орієнтовані на використання міжнародного стандарту мов програмування ПЛК – IEC 61131-3, що сприяє підвищенню уніфікації та переносності проектів.

Інформаційна складова системи побудована таким чином, щоб забезпечити збереження нормативно-довідкових даних, реєстрацію змінної інформації, формування аналітичних звітів і підтримку комунікацій з вищими рівнями диспетчеризації, такими як системи телемеханіки трубопровідного транспорту. Усі інформаційні потоки піддаються структурованій обробці й архівації, що забезпечує збереження технологічної спадковості та формує умови для подальшого аналізу ефективності виробничих процесів.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

## 4.2 Функціональна схема автоматизації резервуарного парку

Функціональна схема автоматизації резервуарного парку відображає структуру та принципи побудови системи автоматичного контролю, керування і захисту технологічних процесів, що відбуваються під час зберігання, приймання та відпуску нафтопродуктів. Основна мета такої автоматизації полягає у забезпеченні безперервного моніторингу параметрів, оперативного реагування на відхилення, дистанційного впливу на виконавчі механізми, а також гарантованого захисту в умовах аварійних ситуацій.

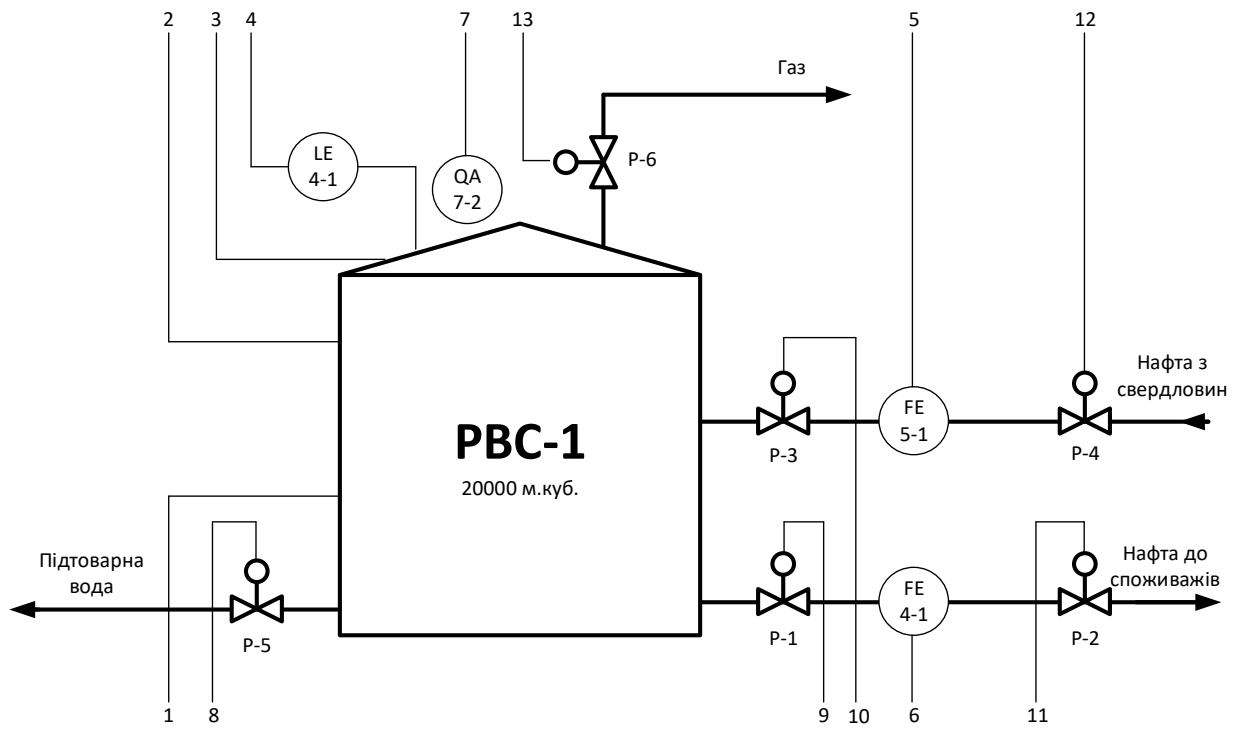
В межах поставлених завдань, система автоматизації повинна забезпечувати:

- дистанційне спостереження за рівнем наповнення та спорожнення резервуарів, з можливістю візуалізації цих параметрів у реальному часі;
- управління станом запірної арматури (засувки) як на приймальних, так і на роздавальних магістралях, із врахуванням поточного стану технологічного процесу;
- автоматичне виконання алгоритмів протиаварійного захисту, що базуються на перевищенні допустимих меж контрольованих параметрів;
- високоточний контроль фізичних змінних, які визначають баланс надходження, зберігання та витрату нафтопродуктів, із подальшою їх передачею до підсистеми обліку.

На рис. 4.2 представлено функціональну схему автоматизації резервуарного парку, яка поєднує первинні давачі, програмно-логічні пристрої керування, виконавчі механізми, а також канали передачі даних до рівня SCADA.

У структурі автоматизованої системи передбачено застосування комплексу засобів контрольно-вимірювальних приладів та автоматики (КВП і А), кожен з яких виконує окрему функцію в межах загального технологічного контуру.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63



		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		$L_{\text{мін}} - 1\ 000\ \text{мм}$	$L_{\text{макс}} - 13\ 000\ \text{мм}$	Рівність-не більше 2000 Па	$L_{\text{розр}} - 1\ 000 - 13\ 000\ \text{мм}$	$F_{\text{розр}} - 0 - 600\ \text{м}^3/\text{год}$	$F_{\text{нарр}} - 0 - 600\ \text{м}^3/\text{год}$	95 °С	Відкр/Закр	Відкр/Закр	Відкр/Закр	Відкр/Закр	Відкр/Закр	Відкр/Закр
Прилади по місцю		LSA 1	LSA 2	PE 3	LT 4-2	FT 5-2	FT 6-2	QA 7-2						
Siemens S7-1500	Контроль	←												
	Сигналізація	←												
	Керування	←												
	Блокування	←												

Рисунок 4.2 - Функціональна схема автоматизації

Для реалізації автоматизованого керування резервуарним парком із чотирма резервуарами, що функціонують у парному режимі, доцільним є використання модульного програмованого логічного контролера (ПЛК) з розширеними можливостями аналогового й дискретного вводу/виводу, інтеграції із системами SCADA, а також підтримкою аварійної сигналізації та протипожежного захисту.

З огляду на вимоги до кількості вхідних/вихідних сигналів, наявність як аналогових, так і дискретних давачів, а також потребу в керуванні запірною арматурою з аналоговими і дискретними приводами, доцільно обрати ПЛК сімейства Siemens S7-1500, зокрема контролер CPU 1512SP-1 PN у складі розподіленої системи автоматизації з використанням периферії ET 200SP (табл. 4.1). Цей вибір обумовлено високою надійністю, гнучкістю конфігурації, широким спектром доступних модулів вводу/виводу, а також відповідністю стандартам безпеки й можливістю інтеграції з промисловими протоколами (PROFINET, PROFI-safe, HART тощо) [8].



Рисунок 4.3 – ПЛК сімейства Siemens S7-1500

Характеристика центрального процесора ПЛК Siemens S7-1500 CPU 1512SP-1 PN:

- Центральний модуль керування у компактному корпусі, призначений для розподіленого монтажу (SP – *slice periphery*), оптимально підходить для об'єктів із децентралізованою структурою;
- Цикл обробки логічних операцій: до 1 нс на команду;
- Оперативна пам'ять: 1 МБ для користувацьких програм;

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

- Вбудовані інтерфейси: 1 × PROFINET, підтримка HMI, SCADA, віддаленого доступу;

- Безпека: підтримка захисту даних, контроль доступу, опціональна функціональність Safety Integrated для реалізації протиаварійного захисту;

- Масштабованість: підтримка до 32 модулів вводу/виводу через розширювальну шину ET 200SP.

Дискретні входи (рівень: min, max; пожежна сигналізація), модуль Siemens DI 16x24VDC ST:

- Призначення: підключення до 16 дискретних вхідних сигналів постійного струму;

- Напруга: 24 V DC;

- Тип входу: PNP, фронт активний;

- Діагностика: контроль стану входу, наявність короткого замикання або обриву;

- Кількість каналів: 16 каналів на один модуль;

- Потрібна кількість модулів: 1 модуль (для 8 сигналів: min/max × 4 резервуари = 8 + 1 сигнал пожежі).

Аналогові входи (рівень, тиск, витрати), модуль Siemens AI 8xU/I 2-/4-wire ST HART:

- Призначення: підключення аналогових сигналів струму або напруги від давачів з діапазонами:

- 0–20 mA / 4–20 mA;

- 0–10 V;

- Тип підключення: 2- та 4-провідна схема;

- Кількість каналів: 8;

- Інтерфейс HART: підтримка конфігурації та діагностики інтелектуальних датчиків;

- Роздільна здатність: 16 біт;

- Кількість сигналів:

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

- 4 рівнеміри (аналогові) – 4 канали;
- 4 датчики тиску – 4 канали;
- 4 витратоміри – 4 канали (2 притоки, 2 витоки на 2 пари резервуарів).

Потрібно: 2 модулі AI 8xU/I – 8 каналів на кожному, разом 16 каналів для 12 сигналів.

Аналогові виходи (засувки з аналоговим керуванням), модуль Siemens AQ 4xU/I ST:

- Призначення: генерація аналогових керуючих сигналів (0–10 В, 4–20 мА) для виконавчих механізмів;
- Кількість каналів: 4;
- Тип виходу: активний, напруга/струм;
- Прецизійність: 16 біт;
- Призначення в системі: керування положенням засувки Р-2 та Р-4 (аналоговий привід).

Потрібно: 1 модуль AQ 4xU/I ST.

Дискретні виходи (засувки з двопозиційним керуванням), модуль Siemens DO 16x24VDC/0.5A ST:

- Призначення: керування виконавчими пристроями із цифровим керуванням (ON/OFF);
- Напруга: 24 В DC, вихід до 0,5 А на канал;
- Кількість каналів: 16;
- Застосування: керування двома двопозиційними засувками.

Потрібно: 1 модуль DO 16x24VDC/0.5A ST.

Сигнал з датчика пожежі (дискретний) підключається до відповідного каналу модуля DI 16x24VDC ST. У разі його спрацювання контролер реалізує алгоритм аварійного блокування заздалегідь прописаною програмою, незалежно від SCADA-рівня, що забезпечує відповідність SIL1/SIL2 за IEC 61508 (при реалізації резервування).

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Таблиця 4.1 – Узагальнена структура конфігурації ПЛК

Компонент	Тип	Кільк.	Призначення
CPU 1512SP-1 PN	Центральний процесор	1	Управління логікою, зв'язок з SCADA, обробка сигналів
AI 8xU/I 2-/4-wire HART	Аналогові входи	2	Рівень, тиск, витрати (12 сигналів)
AQ 4xU/I ST	Аналогові виходи	1	Керування 2-ма аналоговими засувками
DI 16x24VDC ST	Дискретні входи	1	Рівні min/max × 4, пожежа
DO 16x24VDC/0.5A ST	Дискретні виходи	1	Керування 2-ма двопозиційними засувками
Блок живлення PS 60W 24VDC	Блок живлення	1	Живлення контролера та модулів вводу/виводу
BaseUnits BU20-P	Базові модулі підключення	6	Механічна та електрична база для монтажу модулів I/O в системі ET 200SP

У контексті побудови автономної системи автоматичного керування резервуарним парком, що містить чотири резервуари, які працюють попарно, особливої уваги заслуговує вибір відповідних первинних перетворювачів – датчиків для вимірювання рівня, тиску, витрати, а також сигналізаторів граничних значень і запірно-регулюючої арматури. Точність, надійність та сумісність таких технічних засобів безпосередньо впливають на ефективність автоматизації, оперативність реагування на аварійні ситуації та забезпечення безпечного зберігання і транспортування нафтопродуктів.

У системі передбачено використання як аналогового, так і дискретного контролю рівня рідини. Вимоги охоплюють вимірювання в межах 0...15 000 мм з контролем граничних значень: мінімального (1 000 мм) та максимального (13 000 мм).

Вибрано аналоговий рівнемір VEGA VEGAPULS 64. Це радарний датчик безконтактного типу, призначений для точного і стабільного вимірювання рівня рідин у великих резервуарах. Завдяки викор истанню високочастотного

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

імпульсного сигналу він забезпечує надійне функціонування в умовах, де наявні пари нафтопродуктів, зміни температури та можливе утворення конденсату. Його конструкція оптимізована для тривалого безперебійного функціонування в агресивних середовищах, де вимагається висока точність і швидка реакція на зміну рівня [9].



Рисунок 4.3 – Аналоговий рівнемір VEGA VEGAPULS 64

Аналоговий рівнемір VEGA VEGAPULS 64:

- Тип: радарний рівнемір безконтактного принципу дії.
- Принцип роботи: вимірювання часу проходження імпульсу від антенного блоку до поверхні рідини і назад.
- Діапазон вимірювання: до 30 метрів (30 000 мм), що дозволяє з надлишком перекривати потрібний діапазон.
- Точність:  $\pm 2$  мм.
- Інтерфейс: 4–20 мА з підтримкою HART-протоколу.
- Корпус: вибухозахищений (Ex d), IP68.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Матеріал зонда: PTFE, стійкий до дії агресивних середовищ, зокрема нафтопродуктів.
- Переваги: безконтактність, висока стійкість до змін температури й тиску, низька чутливість до парів.

Обрано сигналізатори рівня Emerson Mobrey S01. Це дискретні електромеханічні пристрої, призначені для контролю досягнення заздалегідь визначених мінімальних і максимальних рівнів у резервуарі. Завдяки простому принципу дії, стійкості до впливу вібрацій, температурних коливань і наявності пари вони ефективно реалізують функцію аварійного захисту та запуску алгоритмів аварійного керування [10].



Рисунок 4.4 – Дискретний сигналізатор рівня Emerson Mobrey S01

Дискретні сигналізатори рівня: Emerson Mobrey S01 (для min/max)

- Принцип дії: електромеханічний або магнітно-поплашковий.
- Тип виходу: двопозиційний сухий контакт (SPDT).
- Монтаж: вертикальний/горизонтальний.
- Виконання: вибухозахищене (ATEX/IECEX).
- Призначення: спрацьовує при досягненні встановленого граничного рівня (1000 мм / 13000 мм).
- Переваги: простота, надійність, тривалий ресурс експлуатації без обслуговування.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Для контролю надлишкового тиску в резервуарах застосовано датчик тиску WİKA A-10. Це тензOMETричний сенсор, що відзначається високою чутливістю до низького діапазону тисків і придатний для постійного моніторингу тиску в герметичних резервуарах. Його стабільна робота гарантує раннє виявлення відхилень, що потенційно можуть призвести до перевищення допустимих навантажень на корпус резервуара або дихальну арматуру.

У межах системи контролюється надлишковий тиск у резервуарах. Робочий діапазон не перевищує 2 000 Па (20 мбар), отже, необхідне застосування надчутливих низькодіапазонних перетворювачів [11].



Рисунок 4.5 – Перетворювач тиску WİKA A-10

#### Перетворювач тиску WİKA A-10

- Тип: тензOMETричний датчик з мембраною;
- Діапазон вимірювання: від 0 до 25 мбар (2 500 Па);
- Вихідний сигнал: 4–20 мА;
- Точність: до  $\pm 0.25$  % від повного діапазону;
- Матеріал мембрани: нержавіюча сталь AISI 316L;
- Ступінь захисту: IP67;

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

- Конструкція: підходить для кріплення безпосередньо на дихальних клапанах резервуара;
- Переваги: високий рівень чутливості при низьких тисках, стійкість до вібрацій і температурних коливань.

Контроль витрати на вході та виході резервуарів є важливою умовою для обліку матеріальних потоків і балансування маси. Витратоміри обрано типу Endress+Hauser Proline Promag P 300. Це електромагнітні прилади, що забезпечують прецизійне вимірювання витрати рідини в умовах середовищ з високою в'язкістю або електропровідністю, зокрема нафтопродуктів. Їх застосування дозволяє точно вимірювати притік і витік з резервуарів, забезпечуючи при цьому необхідні умови для реалізації облікових та контрольних функцій в АСУ ТП [12].



Рисунок 4.6 – Аналоговий витратомір Endress+Hauser Proline Promag P 300

Аналоговий витратомір Endress+Hauser Proline Promag P 300:

- Тип: електромагнітний витратомір;
- Діапазон вимірювання: 0–600 м<sup>3</sup>/год;

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

- Діаметр трубопроводу: DN100–DN200;
- Точність:  $\pm 0.5$  % від показу;
- Інтерфейс: 4–20 мА, HART, Modbus;
- Корпус: нержавіюча сталь, IP68;
- Специфікація: спеціально адаптований до агресивних і в'язких рідин, у т.ч. нафтопродуктів;
- Переваги: безмеханічна конструкція, стійкість до відкладень, точне вимірювання при низьких швидкостях потоку.

Для своєчасного виявлення займання доцільно встановити комбіновані мультиспектральні інфрачервоні датчики з фіксацією відкритого полум'я. Для системи виявлення займання вибрано інфрачервоний детектор Spectrex 40/40I IR3. Це оптичний сенсор, здатний ідентифікувати полум'я завдяки аналізу інфрачервоного спектру випромінювання у трьох діапазонах. Його функціонування не залежить від денного освітлення або задимленості, що робить його ефективним для резервуарних майданчиків з високим ризиком займання горючих випарів [13].



Рисунок 4.6 – Датчик пожежі Spectrex 40/40I IR3

Датчик пожежі Spectrex 40/40I IR3:

- Принцип роботи: триканальний інфрачервоний аналіз спектра полум'я;
- Дальність виявлення: до 65 м для нафтопродуктів;
- Кут огляду: до 100°;

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

- Час реакції: менше 3 секунд;
- Ступінь захисту: IP66/IP67, Exd IIB+H2 T5;
- Вихід: дискретний (релейний сигнал тривоги);
- Переваги: нечутливість до сонячного світла й електромагнітних перешкод, надійність в агресивному середовищі.

У системі використовуються як двопозиційні (відкрито/закрито), так і регульовальні запірні пристрої з аналоговим керуванням. Вибір засувок залежить від функції в схемі (розподіл, злив, перерозподіл) та типу керування. Засувки з двопозиційним керуванням реалізовано на базі електроприводів Auma SA 07.2. Це електромеханічні виконавчі механізми, призначені для забезпечення повного відкриття або повного закриття запірної арматури за сигналом керування. Їх застосування дозволяє точно реалізувати сценарії перемикання потоків нафтопродуктів та оперативно реагувати на зміну режиму роботи системи [14].



					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

## Рисунок 4.7 – Двопозиційна засувка Auma SA 07.2

### Двопозиційна засувка Auma SA 07.2

- Тип: електропривід з двопозиційним керуванням.
- Крутний момент: 10–100 Н·м.
- Напруга живлення: 400 В, 3~.
- Інтерфейс: двопровідне реле, стан "відкр./закр."
- Захист: IP68, Ex.
- Переваги: надійна робота в умовах вибухонебезпечних середовищ, можливість ручного дублювання.

Засувки з плавним керуванням обрано у вигляді виконавчих механізмів AUMA SA-Ex / SAR-Ex, які є електроприводами багатооборотної дії з можливістю точного аналогового позиціонування. Ці приводи забезпечують безперервне та високоточне регулювання положення трубопровідної арматури відповідно до вхідного аналогового сигналу 4–20 мА. Завдяки своїй модульній конструкції та сумісності з промисловими інтерфейсами, вони ефективно інтегруються в структуру автоматизованої системи керування резервуарним парком. Застосування таких приводів забезпечує надійне та плавне керування потоками рідини при завантаженні та вивантаженні резервуарів великого діаметра (до DN 700 мм), що дає змогу уникнути гідравлічних ударів, зменшити втрати нафтопродуктів і досягти сталої динаміки процесу регулювання. Конструкція приводу відповідає вимогам вибухозахисту, що є необхідною умовою для експлуатації в умовах пожежонебезпечних середовищ зберігання нафти [15].

Це серія part-turn приводів з вбудованими електронними контролерами, пристосованими для аналогового керування. Вони забезпечують точне регулювання положення з широким кутом повороту до 90°, відповідають стандартам Explosion-proof (Ex) для вибухонебезпечних зон. Типовий крутний момент варіюється до 2 400 Nm, однак можливі кастомні модифікації з більшим

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

запасом (до 5 000–6 000 Nm), що підходить для клапанів діаметром до DN 700 мм.



Рисунок 4.8 – Аналогова засувка AUMA SQ-Ex / SQR-Ex

Контролер SQ-Ex підтримує:

- аналоговий вхід 4–20 мА;
- цифрову комунікацію PROFIBUS / Modbus;
- автоматичну діагностику моменту та ходу;
- високу точність позиціонування при DN 700.

#### 4.3 Розробка SCADA-системи для резервуарного парку

Проектування SCADA-системи для автоматизації резервуарного парку в середовищі Siemens WinCC передбачає побудову інтегрованого інформаційно-керуючого комплексу, який забезпечує централізований моніторинг, диспетчеризацію та аналітичну обробку даних, що характеризують процеси зберігання, обліку та відпуску нафтопродуктів. Головним завданням є розробка графічного інтерфейсу оператора, що дозволяє в реальному часі відобразити поточний стан резервуарів, рівні заповнення, значення тиску, температури та положення запірно-регулювальної арматури, з можливістю оперативного

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

керування та інтервенції у технологічні режими.

У рамках архітектури WinCC реалізовано багаторівневу систему обробки даних, що включає безперервний збір аналогових і дискретних сигналів з польових пристроїв, їхнє попереднє оброблення, масштабування, нормалізацію та прив'язку до віртуальних каналів. Завдяки застосуванню функціоналу WinCC Graphics Designer розроблено візуальні панелі з інтерактивними мнемосхемами, які охоплюють резервуарні ємності, трубопровідну обв'язку, датчики рівня, тиску, температури та витрати. Це дозволяє оператору швидко оцінювати технологічну ситуацію та приймати обґрунтовані рішення щодо керування (рис. 4.9).

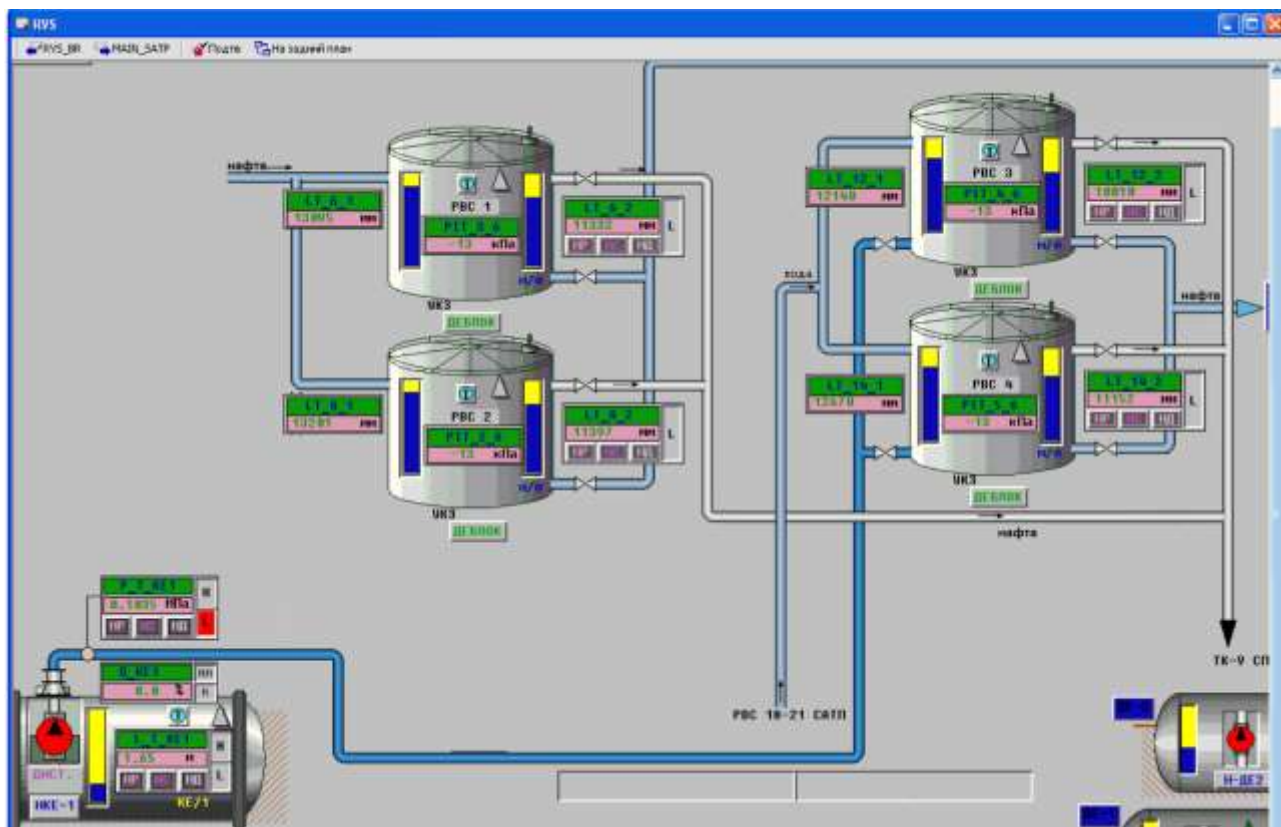


Рисунок 4.9– Візуалізація резервуарного парку в середовищі Siemens WinCC

Суттєвою перевагою платформи Siemens WinCC є наявність вбудованих інструментів історизації даних (WinCC Tag Logging, WinCC Alarm Logging), що дозволяють забезпечити довготривале збереження значень технологічних

параметрів, аварійних подій, команд оператора та системних збоїв. Таке архівування створює підґрунтя для ретроспективного аналізу динаміки процесу, ідентифікації аномалій та встановлення причин відхилення від номінального режиму. Інтерфейс трендового аналізу дає змогу будувати багатоканальні графіки з масштабуванням у часі, накладанням контрольних лімітів і логічною інтерпретацією подій.

Для забезпечення безвідмовної роботи системи передбачено використання розподіленої клієнт-серверної архітектури WinCC, яка дозволяє реалізувати географічно рознесене середовище моніторингу з підтримкою віддалених робочих станцій, захищеного доступу до архівів та дублювання критично важливих вузлів. Інтеграція з іншими рівнями автоматизації здійснюється за допомогою стандартних протоколів OPC UA, PROFINET, Modbus TCP та підтримки інтеграції з контролерами серій S7-1200/1500.

Розроблена SCADA-система включає також модуль сигналізації, що реалізується за допомогою WinCC Alarm System, з можливістю ієрархізації повідомлень, прив'язки до пріоритетів і сценаріїв реагування. Це дозволяє мінімізувати час реакції на порушення технологічного режиму та ефективно інформувати персонал про необхідні дії щодо усунення загроз або аварій.

#### **4.4 Проектування схеми зовнішніх з'єднань та загального вигляду щита**

Процес розроблення схеми зовнішніх з'єднань та загального вигляду щита автоматизації резервуарного парку є важливим етапом проектування системи керування, що забезпечує надійну та безпечну роботу обладнання. Цей процес передбачає комплексний підхід, спрямований на узгодження технічних, технологічних та експлуатаційних вимог.

На початковому етапі проводиться детальний аналіз функціональних задач системи автоматизації, зокрема визначення типів датчиків, виконавчих механізмів, контролерів та інших пристроїв, що будуть входити до складу

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

системи. Враховуються вимоги до типів сигналів (аналогові, дискретні), протоколів обміну даними, а також необхідність застосування захисних пристроїв, що гарантують безпеку експлуатації.

Після цього формується принципова схема зовнішніх з'єднань, яка відображає взаємозв'язки між датчиками, виконавчими механізмами, контролерами та системами живлення. Ця схема включає в себе розподіл сигналів на входи і виходи ПЛК, а також організацію ліній живлення, заземлення і захисту від перенапруг. Особлива увага приділяється правильному маркуванню кабелів, застосуванню стандартних роз'ємів і дотриманню норм електробезпеки.

Паралельно з розробкою схеми зовнішніх з'єднань здійснюється проектування фізичного розташування компонентів у щиті управління. Для цього обирається оптимальний тип щита, який відповідає експлуатаційним умовам (наприклад, ступінь захисту IP, кліматичні умови, розміщення). Визначається раціональна компоновка апаратури з урахуванням зручності монтажу, обслуговування та вентиляції.

Наступним етапом є розробка загального вигляду щита у вигляді креслень або 3D-моделей, де відображаються розміщення ПЛК, клемних колодок, пристроїв захисту, засобів індикації та органів керування. Цей етап дозволяє оцінити ергономіку конструкції, оптимізувати простір і забезпечити безперешкодний доступ до важливих елементів.

Особливу увагу приділяють системі маркування компонентів та кабелів у щиті для забезпечення ідентифікації під час монтажу та подальшої експлуатації. Вся документація узгоджується з вимогами стандартів, таких як ГОСТ, IEC або EN, що регламентують вимоги до електротехнічних схем і обладнання.

Завершальним етапом проектування є перевірка розроблених схем і креслень на відповідність технічним вимогам і можливість інтеграції з іншими підсистемами АСУ ТП резервуарного парку. Після затвердження документації розпочинається виготовлення та монтаж ЩУ, підключення обладнання і проведення пуско-налагоджувальних робіт.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

## Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто структуру системи автоматизації резервуарного парку, що побудована за трирівневим ієрархічним принципом, де кожен рівень виконує специфічні функції контролю, управління та обробки інформації, що забезпечує комплексний підхід до автоматизації технологічного процесу. Визначено функціональні завдання системи, серед яких дистанційний контроль рівня і витрат, автоматичний захист, а також облік нафтопродуктів.

Детально проаналізовано вибір технічних засобів автоматизації, включно з програмованим логічним контролером, датчиками рівня, тиску, витрати та пожежної безпеки, а також регулювальними засувками з плавним та дискретним керуванням. Обґрунтовано відповідність обраних пристроїв технологічним вимогам і нормам, що гарантує надійність і безпеку роботи системи.

Особливу увагу приділено проектуванню функціональної схеми автоматизації та розробленню програмного забезпечення SCADA для моніторингу і керування, що забезпечує високу оперативність управлінських рішень та зручність взаємодії операторів з системою. Також описано процес створення схеми зовнішніх з'єднань і загального вигляду щита управління, що враховує ергономічність, технічні вимоги та безпеку експлуатації.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській роботі проведено дослідження та розробку системи автоматизованого керування резервуарним парком для зберігання та обліку нафтопродуктів. Особлива увага приділена вибору та інтеграції сучасних програмованих логічних контролерів (ПЛК) з урахуванням технологічних вимог, а також оптимізації процесів контролю рівня, тиску, витрати і пожежної безпеки. Використання ПЛК сімейства Siemens S7-1500 забезпечує надійність, гнучкість і масштабованість системи, що дозволяє ефективно реалізувати функції дистанційного моніторингу, автоматичного захисту та керування технологічним обладнанням резервуарного парку.

В першому розділі було розглянуто методологію визначення фактичного обсягу нафти в резервуарах, а також основні принципи вимірювання і корекції параметрів обсягу і маси нафти з урахуванням температурних впливів та фізичних властивостей матеріалів резервуара і засобів вимірювань. Було обґрунтовано використання градуювальних таблиць, складених відповідно до нормативних документів, а також наведено формули для коригування обсягу нафти залежно від температури стінок резервуара і характеристик матеріалів, що беруть участь у вимірювальному процесі. Визначення щільності нафти виконують із застосуванням спеціалізованих приладів або відповідно до вимог стандартів, а отримані значення приводять до стандартних умов для уніфікації даних. Особливу увагу приділено методам вимірювання температури нафти, які базуються на застосуванні стаціонарних та переносних перетворювачів температури, що забезпечує отримання середніх температурних значень із необхідною точністю. Зазначено важливість дотримання термінів та процедур вимірювань для забезпечення достовірності результатів. Розглянуто методи визначення маси бруто нафти у резервуарах та при її відкачці або закачуванні, що базуються на різниці мас до та після технологічних операцій, що дозволяє вести точний облік нафтопродуктів. Визначення вмісту баласту у нафті

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

відбувається у випробувальних лабораторіях відповідно до нормативних вимог. Також висвітлено особливості автоматизованих систем обліку, які інтегрують вимірювання рівня, щільності та температури нафти для забезпечення оперативного і точного контролю за станом запасів у резервуарах. Загалом, викладені у розділі положення формують науково обґрунтовану основу для організації якісного обліку та контролю обсягів і маси нафтопродуктів у ємностях з урахуванням фізико-хімічних та температурних факторів.

В другому розділі здійснено побудову математичної моделі технологічного об'єкта, що складається з двох ємностей, гідравлічно з'єднаних трубопроводом із локальним опором. З урахуванням фізичних припущень, зокрема постійної густини робочого середовища та незмінного поперечного перерізу ємностей, модель сформульовано на основі рівнянь матеріального балансу, що відображають зміну маси рідини у кожній ємності залежно від витрат на вході та виході. Сформульована система нелінійних диференціальних рівнянь виражає динаміку рівнів у ємностях як функцію поданих витрат. Проведено процедуру лінеаризації цієї моделі навколо усталеного режиму функціонування з використанням розкладу в ряд Тейлора з урахуванням лише лінійних членів. Це дозволило отримати зручну для аналізу та синтезу регуляторів лінеаризовану модель об'єкта. Також розглянуто методика обчислення параметрів нелінійної моделі в умовах стаціонарного режиму, коли часові похідні рівнів дорівнюють нулю. Це забезпечило визначення рівноважних значень витрат та рівнів, необхідних для коректної параметризації моделі. Крім того, виконано апроксимацію статичної характеристики регулюючого органу за допомогою полінома Лагранжа на основі експериментальних даних, отриманих з графічної залежності між керуючим сигналом і витратою. Побудовано інтерполяційний поліном шостого порядку, що дозволяє чисельно оцінювати значення витрати залежно від заданого сигналу керування.

У третьому розділі було здійснено повний цикл синтезу і налаштування автономної системи автоматичного керування гідравлічним об'єктом, що

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

складається з двох взаємопов'язаних контурів. Розраховано параметри ПП-регуляторів для кожного контуру з урахуванням бажаних характеристик динаміки, таких як ступінь коливання та значення дійсної частини комплексно-спряжених коренів, що забезпечило керованість і передбачувану поведінку системи. На основі характеристичних рівнянь контурів, отриманих з передавальних функцій, було перевірено виконання умов стійкості за критерієм Рауса–Гурвіца. Доведено, що при належному виборі параметрів регуляторів система задовольняє вимоги стійкості в кожному з незалежних контурів, а отже, й у системі загалом. У процесі оцінки якості регулювання були використані типові тестові дії у вигляді стрибкоподібного сигналу. Визначено перерегулювання та час регулювання для кожного з контурів, що дозволило здійснити кількісну оцінку ефективності керування. Результати свідчать про те, що синтезована система забезпечує адекватну якість регулювання як за швидкодією, так і за точністю. За допомогою програмної реалізації в середовищі MATLAB автоматизовано процеси обчислення параметрів, побудови графіків перехідних процесів та аналізу їх характеристик. Отримані результати підтверджують працездатність синтезованої системи керування в умовах стрибкоподібної зміни сигналів завдання та її здатність до стабілізації заданих параметрів у кожному з контурів.

В четвертому розділі було розглянуто структуру системи автоматизації резервуарного парку, що побудована за трирівневим ієрархічним принципом, де кожен рівень виконує специфічні функції контролю, управління та обробки інформації, що забезпечує комплексний підхід до автоматизації технологічного процесу. Визначено функціональні завдання системи, серед яких дистанційний контроль рівня і витрат, автоматичний захист, а також облік нафтопродуктів. Детально проаналізовано вибір технічних засобів автоматизації, включно з програмованим логічним контролером, датчиками рівня, тиску, витрати та пожежної безпеки, а також регулювальними засувками з плавним та дискретним керуванням. Обґрунтовано відповідність обраних пристроїв технологічним

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимогам і нормам, що гарантує надійність і безпеку роботи системи. Особливу увагу приділено проектуванню функціональної схеми автоматизації та розробленню програмного забезпечення SCADA для моніторингу і керування, що забезпечує високу оперативність управлінських рішень та зручність взаємодії операторів з системою. Також описано процес створення схеми зовнішніх з'єднань і загального вигляду щита управління, що враховує ергономічність, технічні вимоги та безпеку експлуатації.

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Кучмистенко О.В. Автоматизація технологічних процесів транспорту нафти: навчальний посібник – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. – 408 с.
2. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. К.: Либідь, 1997. 544 с.
3. Горбійчук М. І. Моделювання об'єктів та систем керування в нафтовій та газовій промисловості. Навчальний посібник. В 3-х частинах Івано-Франківськ: Факел, 1999. 603 с.
4. Горбійчук М. І. Математичне моделювання на ЕОМ технологічних об'єктів. Навчальний посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2001. 240 с.
5. Горбійчук М. І. Теорія автоматичного керування. Методичні вказівки до курсової роботи. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024. 65 с.
6. Горбійчук М. І., Пістун Є. П. Числові методи і моделювання на ЕОМ. Навчальний посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2010. 409 с.
7. Гаєв Є. О., Несторенко Б. М. Універсальний математичний пакет MatLab і типові задачі обчислювальної математики: навч. посібник. К.: НАУ, 2004. 176 с.
8. ПЛК сімейства Siemens S7-1500. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/siemens-s7-1500-plc-18108400948.html>
9. Аналоговий рівнемір VEGA VEGAPULS 64. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.vega.com/en/products/product-catalog/level/radar/vegapuls-64>
10. Дискретний сигналізатор рівня Emerson Mobrey S01 [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.automatec-ofc.fr/accueil/271-contacteur-magnetique-de-niveau-a-flotteur-parties-immergees-en-bronze-aluminium.html>
11. Перетворювач тиску WIKA A-10. [Електронний ресурс]. – URL: <https://chemik.com.ua/peretvoriuvach-tysku-wika-a-10-0-100-bar-12719383>

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

12. Аналоговий витратомір Endress+Hauser Proline Promag P 300 [Електронний ресурс]. – URL: <https://chemik.com.ua/peretvoriuvach-tysku-wika-a-10-0-100-bar-12719383>

13. Датчик пожежі Spectrex 40/40I IR3 [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.spectrex.net/documents/guide-model-40-40i-triple-ir-ir3-flame-detector-russian-spectrex-ru-1620334.pdf>

14. Двопозиційна засувка Аума SA 07.2. [Електронний ресурс]. – URL: <https://politex.com.ua/auma-sa-07.2-f10-380v-privod-truboprovodnoy-armatury>

15. Аналогова засувка АУМА SQ-Ех / SQR-Ех. [Електронний ресурс]. – URL: <https://electroprivod.info/category/zadvizhka-auma/>

					БР. АКП-45.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

# ДОДАТКИ

## Додаток А

### А.1 Обчислення параметрів лінеаризованої математичної моделі

```
%=====
%РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ
%МОДЕЛІ ГІДРАВЛІЧНОГО ОБ'ЄКТА
%=====
%Вихідні дані
%  А. Геометричні розміри, м
%  D1-діаметр першої ємності
%  D2-діаметр другої ємності
%  Б. Витрати, кг/с
%  q10-на вході у першу ємність
%  q20-на вході у другу ємність
%  В. Тиски, Па
%  P1-на вході у першу ємність
%  Г. Рівень рідини, м
%  H10-в першій ємності(усталений режим)
%  H20-в другій ємності(усталений режим)
%  Ж. Інші параметри
%  го-густина рідини
%  g-земне прискорення
%-----
%A. Геометричні розміри, м
D1=0.6;
D2=0.6;
R1=D1/2;%Радіус першої ємності
R2=D2/2;%Радіус другої ємності
%-----
%B. Витрата, кг/с
q10=19;
q20=20;
%-----
%В. Тиски, Па
P1=0.14e6;
%-----
%Г. Рівень рідини, м
H10=0.7;
H20=1.0;
%-----
%Ж. Інші параметри
```

```

ro=1000;
g=9.80665;
%=====
%Параметри математичної моделі
%=====
%Коефіцієнти гідравлічних опорів
alfa=q20/sqrt(ro*g*(H20-H10));
alfa10=q10/sqrt(P1-ro*g*H10);
alfa3=(q10+q20)/sqrt(ro*g*H10);
fprintf('ПАРАМЕТРИ НЕЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ\n')
fprintf('alpha=%5.4e\n ',alfa)
fprintf('alpha10=%5.4e alpha3=%5.4e\n',alfa10,alfa3)
%=====
%Наближення Лагранжа
%=====
%Формування вхідних даних
%Вхід:
% N - кількість вузлів інтерполяції
% x0 - початок інтервалу інтерполяції
% xk - кінець інтервалу інтерполяції
%Вихід:
% X - знач. аргументу
% Y - знач. функції f(x)
%-----
%Інтерполяційні вузли (Командний тиск, МПа)
XP=[0 0.02 0.04 0.06 0.08 0.1];
X=XP*1e6;
%Ординати функції у вузлах інтерполяції
Y=[0 0.044 0.068 0.082 0.092 0.1];
%-----
N=length(X);%Кількість вузлів інтерполяції
%-----
%Підпрограма: Визнач. коефіцієнтів Лагранжа
%aLag - коефіцієнти полінома Лагранжа
%=====
[a_lag,d]=fun_Lagran(X,Y);
aLag=a_lag;
a_lag(N)=a_lag(N)-alfa10;
fprintf('\n')
fprintf('КОЕФІЦІЄНТИ ПОЛІНОМА ЛАГРАНЖА\n')
fprintf('a0=%5.4e a1=%5.4e a2=%5.4e\n',a_lag(1),a_lag(2),a_lag(3))

```

```

fprintf('a3=%5.4e a4=%5.4e a5=%5.4e\n',a_lag(4),a_lag(5),a_lag(6))
%-----
%Визначення значення командного тиску
%в усталеному режимі
%-----
%Вхід:
% a_lag-коефіцієнти інтерполяційного полінома
%Вихід:
% U0-значення командного тиску в усталеному
%режимі
%-----
%Знаходимо корені рівняння
%a_lag,n*u^n+a_lag,n-1*x^(n-1)+...+A0=0,
%де A0=a_lag0-alfa10
%Поліном у символічній формі
Poly=poly2sym(a_lag);
%Розв'язок рівняння
r=solve(Poly);
%Перетворення коренів рівняння із
%символьної форми у числову
p=double(r);
%Параметри лінеаризованої математичної моделі
n=length(p);
k=1;
for i=1:n
    if and(imag(p(i))==0,real(p(i))>0)
        u0(k)=p(i);
        k=k+1;
    end
end
u10=min(u0);
fprintf('\n')
fprintf('ЗНАЧЕННЯ КОМАНДНОГО ТИСКУ В УСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ\n')
fprintf('U10=%5.4e\n',u0)
%=====
%Параметри лінеаризованої математичної моделі
%=====
syms q2 u H1 H2;%Об'ява символічних змінних
%-----
%Формування залежностей alfa(u)
alfa_u=0;

```

```

for i=1:N
alfa_u=alfa_u+aLag(i)*u^(N-i);
end
%-----
%Праві частини диференціальних рівнянь математичної моделі
S1=pi*R1^2;
S2=pi*R2^2;
F2=(q2-alfa*sqrt(ro*g*(H2-H1)))/(ro*S2);
F1=(alfa_u*sqrt(P1-ro*g*H1)+alfa*sqrt(ro*g*(H2-H1))-...
    alfa3*sqrt(ro*g*H1))/(ro*S1);
%-----
%Обчислення параметрів моделі - a11=dF1/dH1;a12=dF1/dH2;
%a21=dF2/dH1;a22=dF2/dH2;b11=dF1/dU1;b22=dF2/dq2
%(у символічній формі)
f11=diff(F1,1,H1);
f12=diff(F1,1,H2);
f21=diff(F2,1,H1);
f22=diff(F2,1,H2);
z11=diff(F1,1,u);
z22=diff(F2,1,q2);
A11=subs(f11,[u H1 H2],[u10 H10 H20]);
A12=subs(f12,[u H1 H2],[u10 H10 H20]);
A21=subs(f21,[q2 H1 H2],[q20 H10 H20]);
A22=subs(f22,[q2 H1 H2],[q20 H10 H20]);
B11=subs(z11,[u H1 H2],[u10 H10 H20]);
B22=subs(z22,[q2 H1 H2],[q20 H10 H20]);
%-----
%Параметри моделі (у числовій формі)
a12=double(A12);
a21=double(A21);
a22=double(A22);
a11=double(A11);
b11=double(B11);
b22=double(B22);
A=[a11 a12;a21 a22];
B=[b11 0;0 b22];
fprintf('\n')
fprintf('ПАРАМЕТРИ ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ\n')
fprintf('Елементи матриці A\n')
fprintf('a11=%5.4e a12=%5.4e\n',a11,a12)
fprintf('a21=%5.4e a22=%5.4e\n',a21,a22)

```

```

fprintf('Елементи матриці B\n')
fprintf('b11=%5.4e b22=%5.4e\n',b11,b22)
%-----
%Формування файлу параметрів моделі
save('ParametersModel','a11','a12','a21','a22','b11','b22','H10','H20')
%-----

```

## **M-файл до програми**

```

function [a,d]=fun_Lagran(X,Y)
%=====
%Вхід: X - вектор абсцис
%      Y - вектор ординат
%Вихід: a - матр. коефіцієнтів інтерпол.
%        полінома Лагранжа
%      d - матр. коефіцієнтів полінома Лагранжа
n=length(X);%Кількість вузлів інтерпол.
N=n-1;
a=zeros(n,n);
%=====
%Формування коефіцієнтів полінома Лагранжа
for k=1:N+1
    V=1;
    for j=1:N+1
        if k~=j
            V=conv(V,poly(X(j)))/(X(k)-X(j));
        end
    end
    d(k,:)=V;
end
%=====
%Визначення коефіцієнтів інтерполяційного
%полінома Лагранжа
a=Y*d;

```

У результаті обчислень за наведеною програмою отримані такі результати:

### **ПАРАМЕТРИ НЕЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ**

alpha=3.6873e-01

alpha10=5.2072e-02 alpha3=4.7071e-01

### **КОЕФІЦІЄНТИ ПОЛІНОМА ЛАГРАНЖА**

$a_0=0.0000e+00$   $a_1=-1.0417e-21$   $a_2=3.3333e-16$   
 $a_3=-4.2083e-11$   $a_4=2.9167e-06$   $a_5=-5.2072e-02$

#### ЗНАЧЕННЯ КОМАНДНОГО ТИСКУ В УСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ

$U_{10}=1.6833e+05$

$U_{10}=2.5482e+04$

#### ПАРАМЕТРИ ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Елементи матриці А

$a_{11}=-2.1889e-01$   $a_{12}=1.1789e-01$

$a_{21}=1.1789e-01$   $a_{22}=-1.1789e-01$

Елементи матриці В

$b_{11}=1.7452e-06$   $b_{22}=3.5368e-03$

## Додаток Б

### Б.1 Програмне забезпечення автономної системи регулювання

Програма обчислення параметрів налаштування ПІ-регулятора та визначення стійкості автономної системи

```
%=====
% Обчислення параметрів передавальних функцій об'єкта
% і компенсатора перехресних зв'язків
%=====
% Вхідні дані
% beta1 і beta2-значення дійсної частини
% комплексно-спряженого кореня (за модулем)
% mu1 і mu2-ступінь коливання системи
% -----
load ParametersModel
beta1=0.5;
mu1=0.7;
beta2=0.8;
mu2=0.1;
alpha11=-b11*a22;
alpha12=b22*a12;
alpha21=b11*a21;
alpha22=-b22*a11;
alpha1=-(a11+a22);
alpha2=a11*a22-a12*a21;
fprintf('ПАРАМЕТРИ МАТРИЧНОЇ ПФ W(p)\n')
fprintf('alpha11=%3.4e, alpha12=%3.4e, ',alpha11,alpha12)
fprintf('alpha21=%3.4e, alpha22=%3.4e\n',alpha21,alpha22)
fprintf('alpha1=%3.4e, alpha2=%3.4e\n',alpha1,alpha2)
% -----
B01=b11*b22;
B11=b11*alpha22+b22*alpha11;
B21=alpha11*alpha22;
% -----
B02=b22*alpha12;
B12=alpha12*alpha22;
% -----
B03=b11*alpha21;
B13=alpha11*alpha21;
% -----
```

```

A0=B01;A1=B11;
A2=alpha11*alpha22-alpha12*alpha21;
% -----
fprintf('ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ')
fprintf('КОМПЕНСАТОРА ПЕРЕКРЕСНИХ ЗВ'ЯЗКІВ\n')
fprintf('Коефіцієнти чисельника ПФ w11 і w22\n')
fprintf('B0=%3.4e, B11=%3.4e, B21=%3.4e\n',B01,B11,B21)
fprintf('Коефіцієнти чисельника ПФ w12\n')
fprintf('B02=%3.4e, B12=%3.4e \n',B03,B13)
fprintf('Коефіцієнти чисельника ПФ w21\n')
fprintf('B03=%3.4e, B13=%3.4e \n',B03,B13)
fprintf('Коефіцієнти знаменника ПФ w11,w12,w21,w22\n')
fprintf('A0=%3.4e, A1=%3.4e, A2=%3.4e\n',A0,A1,A2)
% =====
% Обчислення параметрів налаштування ПІ-регулятора
% першого контуру
eta1=-(a22*(2*beta1-alpha1)-alpha2+beta1^2*(1+mu1^2))/...
(beta1^2*(1+mu1^2)/a22+a22+2*beta1);
delta11=2*beta1+mu1;
delta31=beta1^2*(1+mu1^2)*eta1;
C01=-delta31/(a22*b11);
C11=(delta11-alpha1)/b11;
% -----
fprintf('ПЕРШИЙ КОНТУР\n')
fprintf('Ступінь стійкості\n')
fprintf('eta1=%3.4f\n',eta1)
fprintf('Параметри налаштування ПІ-регулятора C0, C1\n')
fprintf('C0=%3.4e\n',C01)
fprintf('C1=%3.4e\n',C11)
% -----
% Обчислення параметрів налаштування ПІ-регулятора
% другого контуру
eta2=-(a11*(2*beta2-alpha1)-alpha2+beta2^2*(1+mu2^2))/...
(beta2^2*(1+mu2^2)/a11+a11+2*beta2);
delta12=2*beta2+mu2;
delta32=beta2^2*(1+mu2^2)*eta2;
C02=-delta32/(a11*b22);
C12=(delta12-alpha1)/b22;
fprintf('ДРУГИЙ КОНТУР\n')
fprintf('Ступінь стійкості\n')
fprintf('eta2=%3.4f\n',eta2)

```

```

fprintf('Параметри налаштування ПІ-регулятора C0, C1\r')
fprintf('C0=%3.4e\n',C02)
fprintf('C1=%3.4e\n',C12)

% =====
% ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ
% =====
% Перший контур
AL0=alpha1+b11*C11;
AL1=alpha2+b11*(C01-a22*C11);
AL2=-a22*b11*C01;
Delta=AL0*AL1+AL2;
if and(and(and(AL0>0,AL1>0),AL2>0),Delta>0)
    fprintf('Система стійка (перший контур)\r')
else
    error('Система нестійка (перший контур)\r')
end
% -----
% Другий контур
As0=alpha1+b22*C12;
As1=alpha2+b22*(C02-a11*C12);
As2=-a11*b22*C02;
Deltas=As0*As1+As2;
if and(and(and(As0>0,As1>0),As2>0),Deltas>0)
    fprintf('Система стійка (другий контур)\r')
else
    error('Система нестійка (другий контур)\r')
end

```

Результат обчислення параметрів налаштування ПІ-регулятора першого і другого контурів автономної системи та дослідження системи на стійкість

ПАРАМЕТРИ МАТРИЧНОЇ ПФ  $W(p)$

$\alpha_{11}=2.0574e-07$ ,  $\alpha_{12}=4.1696e-04$ ,  $\alpha_{21}=2.0574e-07$ ,  $\alpha_{22}=7.7417e-04$

$\alpha_{11}=3.3678e-01$ ,  $\alpha_{12}=1.1907e-02$

ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ КОМПЕНСАТОРА ПЕРЕХРЕСНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

Коефіцієнти чисельника ПФ  $w_{11}$  і  $w_{22}$

$B_0=6.1723e-09$ ,  $B_{11}=2.0787e-09$ ,  $B_{21}=1.5928e-10$

Коефіцієнти чисельника ПФ w12  
B02=3.5906e-13, B12=4.2330e-14  
Коефіцієнти чисельника ПФ w21  
B03=3.5906e-13, B13=4.2330e-14  
Коефіцієнти знаменника ПФ w11,w12,w21,w22  
A0=6.1723e-09, A1=2.0787e-09, A2=7.3494e-11

#### ПЕРШИЙ КОНТУР

Ступінь стійкості  
eta1=0.1240  
Параметри налаштування ПІ-регулятора C0, C1  
C0=2.2449e+05  
C1=7.8114e+05

#### ДРУГИЙ КОНТУР

Ступінь стійкості  
eta2=0.2277  
Параметри налаштування ПІ-регулятора C0, C1  
C0=1.9015e+02  
C1=3.8544e+02

Система стійка (перший контур)

Система стійка (другий контур)

### Програма побудови перехідних характеристик автономної системи

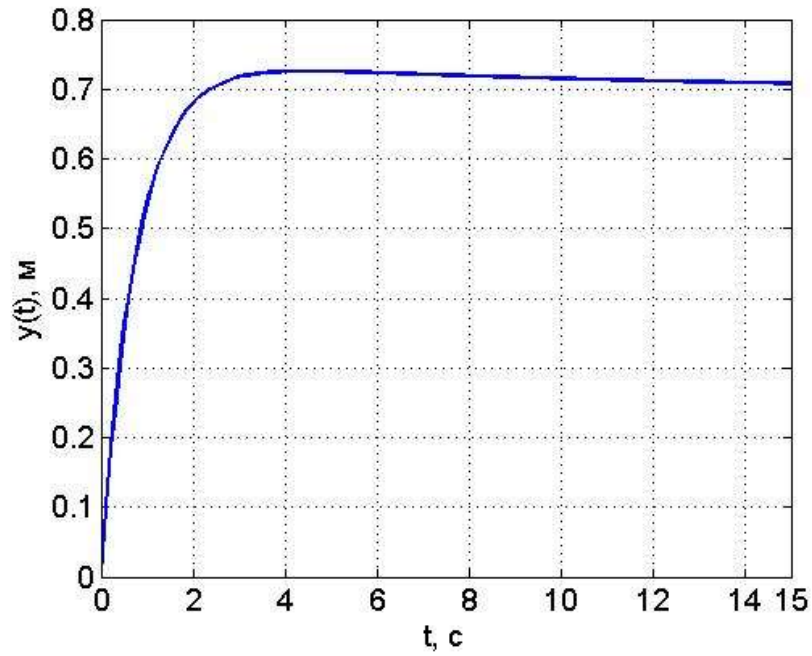
```
% =====  
% ПЕРЕХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ  
% =====  
% Вхідні дані  
% tk -кінцевий час  
% N -кількість отриманих на графіку  
% u01-завдання для першого регулятора  
% u02 -завдання для другого регулятора  
% -----  
load ParametersModel  
load ParametrPI  
tk=15;N=200;  
h=tk/N;t=0:h:tk;  
u01=H10;
```

```

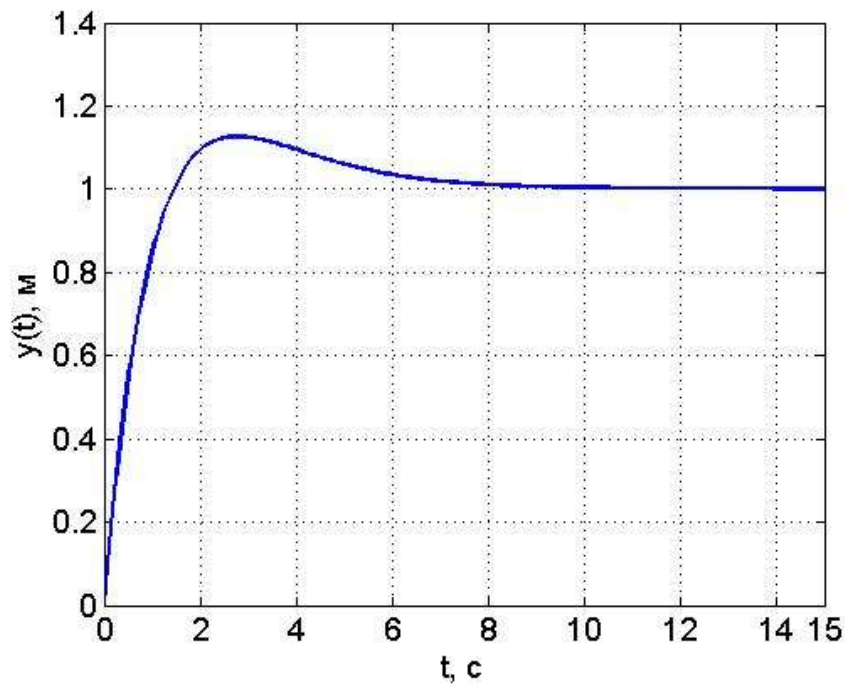
u02=H20;
% -----
% Параметри чисельника першого контура
B01=C11*b11;
B11=b11*(C01-C11*a22);
B21=-C01*b11*a22;
alpha1=-(a11+a22);
alpha2=a11*a22-a12*a21;
% -----
% Параметри знаменника першого контура
A01=1;
A11=C11*b11+alpha1;
A21=C01*b11-C11*b11*a22+alpha2;
A31=-C01*b11*a22;
% -----
% Параметри чисельника другого контура
B02=C12*b22;
B12=b22*(C02-C12*a11);
B22=-C02*b22*a11;
% -----
% Параметри знаменника другого контура
A02=1;
A12=C12*b22+alpha1;
A22=C02*b22-C12*b22*a11+alpha2;
A32=-C02*b22*a11;
B1=[B01 B11 B21];
A1=[A01 A11 A21 A31];
B2=[B02 B12 B22];
A2=[A02 A12 A22 A32];
% -----
% Побудова перехідних характеристик
W1=tf(u01*B1,A1);
W2=tf(u02*B2,A2);
y1=step(W1,t);
y2=step(W2,t);
plot(t,y1);
grid on
figure
plot(t,y2);
grid on
save('pch','t','y1','y2')

```

**Перехідна характеристика автономної системи за першим контуром**



**Перехідна характеристика автономної системи за другим контуром**



## Програма обчислень показників процесу керування

```
% =====  
% ОЦІНКА ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ  
% =====  
% Вхід  
% gamma-величина зони, що визначає час регулювання  
% -----  
load TrCharac  
gamma=0.01;  
n=length(Y1);  
yc1=Y1(end)+gamma;  
yc2=Y2(end)+gamma;  
[sigma1,tc1]=fun_tcon(n,Y1,tout,yc1);  
[sigma2,tc2]=fun_tcon(n,Y2,tout,yc2);  
% -----  
% Графіки перехідних процесів  
% plot(tout,Y1)  
% grid on  
% figure  
% plot(tout,Y2)  
% grid on  
% -----  
fprintf('ПЕРШИЙ КОНТУР\n')  
fprintf('Перерегулювання\n')  
fprintf('sigma=%3.4f%%\n',sigma1*100);  
fprintf('Час регулювання\n')  
fprintf('tc=%3.4f\n',tc1);  
fprintf('ДРУГИЙ КОНТУР\n')  
fprintf('Перерегулювання\n')  
fprintf('sigma=%3.4f%%\n',sigma2*100);  
fprintf('Час регулювання\n')  
fprintf('tc=%3.4f\n',tc2);
```

### Підпрограма fun\_tcon

```
function [sigma,tc]=fun_tcon(n,Y,t,yc)  
% =====  
% ОБЧИСЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ:  
% sigma-перерегулювання  
% tc-час регулювання  
% =====
```

```
sigma=(max(Y)-Y(end))/Y(end);  
for i=n:-1:1  
    if Y(i)>=yc  
        break  
    end  
end  
tc=t(i);
```

#### ПЕРШИЙ КОНТУР

Перерегулювання

sigma=2.4516%

Час регулювання

tc=14.0250с

#### ДРУГИЙ КОНТУР

Перерегулювання

sigma=12.4844%

Час регулювання

tc=12.1500с