

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Віталій Мельник

2026

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

Мельник Віталій Русланович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.5

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення автоматизованої системи керування

(назва роботи)

насосною станцією

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-22-1

В. Р. Мельник

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

Л. Я. Чигур

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

А.І. Лагойда

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ

доцент А. І. Лагойда

« » 20 року

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

Мельнику Віталію Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи керування насосною
станцією

керівник роботи Чигур Людмила Ярославівна, к.т.н, доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 29 » квітня 20 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 15.06.26

3. Вихідні дані до роботи Технологічна схема об'єкту, параметри
проходження процесу, стандарти, каталоги, методичні вказівки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) 1. Аналіз технологічного процесу оборотного водопостачання
гірничо-збагачувального комбінату як об'єкта автоматичного контролю і
керування. 2. Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування.
3. Синтез та аналіз системи автоматичного керування. 4. Розробка проектної
складової САК.

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

Лист 1 - Технологічна схема автоматизації- БР.АКП-75.00.000 01

Лист 2 - Структурна схема автоматизації - БР.АКП-75.00.000 02

Лист 3 - Структурна схема контуру автоматичного регулювання тиску -
БР.АКП-75.00.000 03

Лист 4 - Перехідні процеси ЗСАР з усіма регуляторами - БР.АКП-75.00.000 04

Лист 5 - Функціональна схема автоматизації - БР.АКП-75.00.000 05

Лист 6 - Вид на внутрішні площини шафи керування - БР.АКП-75.00.000 06

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 05.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу оборотного водопостачання гірничо-збагачувального комбінату як об'єкта автоматичного контролю і керування.	01.05.26-11.05.26	
2	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування	12.05.26-21.05.26	
3	Синтез та аналіз системи автоматичного керування	21.05.26-06.06.26	
4	Розробка проектної складової САК	07.06.26-15.06.26	

Студент _____
(підпис)

В. Р. Мельник _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Л. Я. Чигур _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 56 сторінок друкованого тексту, 35 рисунків, 5 таблиць, 12 переліків посилань на джерела. Тема: «Розроблення автоматизованої системи керування насосною станцією». Об'єкт дослідження: технологічний процес транспортування та підтримання заданих параметрів води в системі оборотного водопостачання промислового підприємства, що реалізується насосною станцією з частотно-регульованим електроприводом.

Мета проекту: підвищення ефективності функціонування насосної станції оборотного водопостачання шляхом розроблення та впровадження автоматизованої системи керування, що забезпечує автоматичне регулювання тиску, оптимізацію режимів роботи насосного обладнання, зниження енергоспоживання та захист системи від аварійних ситуацій.

Методи дослідження: методи аналізу та синтезу, математичного моделювання, ідентифікації об'єкта керування, теорії автоматичного керування, комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, методи дослідження стійкості та якості систем автоматичного керування, методи синтезу і налаштування регуляторів, а також методи проектування автоматизованих систем керування технологічними процесами.

Результати кваліфікаційної роботи: проведено аналіз технологічного процесу, розроблено математичну модель системи та виконано ідентифікацію об'єкта керування. Синтезовано одноконтурну систему автоматичного регулювання тиску, проведено налаштування регуляторів різними методами та виконано порівняльний аналіз їх ефективності. Розроблено функціональну схему автоматизації, схеми шаф керування та програмне забезпечення для програмованого логічного контролера у середовищі Control Expert.

Ключові слова: насосна станція, програмований логічний контролер, PID-регулятор, математичне моделювання, енергоефективність, промислова автоматизація.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 56 pages of printed text, 35 figures, 5 tables, 12 lists of references to sources.

Topic: "Development of an automated pumping station control system".

Object of research: technological process of transporting and maintaining specified water parameters in the circulating water supply system of an industrial enterprise, implemented by a pumping station with a frequency-controlled electric drive.

Project goal: increasing the efficiency of the functioning of a circulating water supply pumping station by developing and implementing an automated control system that provides automatic pressure regulation, optimization of pumping equipment operating modes, reducing energy consumption and protecting the system from emergency situations.

Research methods: methods of analysis and synthesis, mathematical modeling, identification of the control object, theory of automatic control, computer modeling in the MATLAB/Simulink environment, methods of studying the stability and quality of automatic control systems, methods of synthesis and tuning of regulators, as well as methods of designing automated process control systems.

Results of qualification work: analysis of the technological process was carried out, a mathematical model of the system was developed and identification of the control object was performed. A single-circuit automatic pressure control system was synthesized, regulators were adjusted using various methods and a comparative analysis of their effectiveness was performed. A functional automation scheme, control cabinet schemes and software for a programmable logic controller in the Control Expert environment were developed.

Keywords: pumping station, programmable logic controller, PID controller, mathematical modeling, energy efficiency, industrial automation.

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
	ВСТУП.....	9
1	АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ.....	12
1.1	Призначення насосної станції оборотного водопостачання та суть процесу.....	12
1.2	Функціональне призначення насосної станції у системі оборотного водопостачання.....	13
1.3	Аналіз технологічної схеми насосної станції оборотного водопостачання.....	15
1.4	Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання.....	17
	Висновки до розділу	18
2	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	19
2.1	Обґрунтування вибору об’єкта автоматизації.....	19
2.2	Визначення характеристик об’єкта автоматизації.....	19
	Висновки до розділу.....	24
3	СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	25
3.1.	Синтез одноконтурної системи автоматичного керування.....	25
3.2	Синтез ефективної системи автоматичного керування.....	26
3.3	Налаштування типових регуляторів.....	31
3.4	Аналіз роботи розроблених систем автоматичного керування.....	33

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розроблення автоматизованої системи керування насосною станцією	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Мельник В.Р.					6	56
Перевір.		Чигур Л.Я.				Група АКП-22-1 ІФНТУНГ		
Реценз.		Чигур І.І.						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

Висновки до розділу.....	34
4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК.....	35
4.1 Вибір технічних засобів автоматизації.....	35
4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	40
4.3 Проектування шаф автоматизації та управління.....	42
4.4 Розробка програмного забезпечення для PLC.....	46
Висновки до розділу.....	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	56

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

АПК – апаратно-програмний комплекс;

ПЛК – програмований логічний контролер;

ЧРП – частотний перетворювач;

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

САК – система автоматичного керування;

САР – система автоматичного регулювання;

ГЗК – гірничо-збагачувальний комбінат;

MATLAB (Matrix Laboratory) – програмне середовище для математичних розрахунків і моделювання;

HART (Highway Addressable Remote Transducer) – протокол цифрового зв'язку з польовими приладами;

Modbus TCP – промисловий мережевий протокол передачі даних через Ethernet;

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості особливої актуальності набувають питання підвищення енергоефективності, надійності та екологічної безпеки технологічних процесів. Одним із важливих напрямів вирішення цих завдань є впровадження автоматизованих систем керування технологічними об'єктами, що забезпечують стабільність режимів роботи обладнання, зниження експлуатаційних витрат та мінімізацію впливу людського фактора. Значну роль у структурі промислових підприємств відіграють системи оборотного водопостачання, які забезпечують повторне використання технічної води та сприяють зменшенню споживання природних водних ресурсів.

Насосні станції оборотного водопостачання є складними технологічними об'єктами, робота яких пов'язана з необхідністю підтримання стабільних параметрів тиску, витрати, температури та рівня рідини. Особливої складності набуває керування насосними агрегатами в умовах змінних навантажень, наявності абразивних домішок у рідині та необхідності забезпечення безперервності виробничого процесу. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні сучасних автоматизованих систем керування, здатних забезпечувати ефективне функціонування насосних станцій в умовах промислової експлуатації.

Актуальність теми бакалаврської роботи полягає у необхідності підвищення ефективності роботи насосної станції оборотного водопостачання шляхом застосування сучасних засобів автоматизації, програмованих логічних контролерів, частотного регулювання електроприводу та адаптивних алгоритмів керування. Використання автоматизованих систем дозволяє забезпечити стабілізацію технологічних параметрів, знизити енергоспоживання, підвищити надійність обладнання та забезпечити захист системи від аварійних режимів роботи.

Обґрунтування вибору теми дослідження пов'язане з широким впровадженням сучасних систем автоматизації у промисловості та постійним зростанням вимог до якості керування технологічними процесами. Аналіз сучасних науково-технічних рішень у галузі автоматизації насосних станцій показує, що найбільш ефективними є системи, побудовані на базі програмованих логічних контролерів із застосуванням частотного регулювання електроприводів та інтеграцією до SCADA-систем.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Разом з тим, існує необхідність адаптації таких рішень до конкретних умов експлуатації, що включають роботу із забрудненими рідинами, підвищені механічні навантаження та необхідність забезпечення високої надійності функціонування обладнання.

Об'єктом дослідження є насосна станція оборотного водопостачання як складний технологічний об'єкт автоматизації.

Предметом дослідження є автоматизована система керування насосною станцією оборотного водопостачання із застосуванням програмованого логічного контролера та частотного регулювання електроприводу.

Метою бакалаврської роботи є розробка автоматизованої системи керування насосною станцією оборотного водопостачання, яка забезпечує стабільне підтримання технологічних параметрів, підвищення енергоефективності та надійності роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

- виконати аналіз технологічного процесу насосної станції оборотного водопостачання як об'єкта автоматизації;
- визначити основні параметри контролю, керування та сигналізації;
- розробити структурну та функціональну схеми автоматизованої системи керування;
- здійснити вибір технічних засобів автоматизації, датчиків, контролера та частотного перетворювача;
- розробити схеми шаф автоматизації та керування;
- синтезувати контур автоматичного регулювання тиску;
- провести моделювання системи та оцінку показників якості перехідних процесів;
- виконати налаштування регуляторів методами Зіглера–Ніколса та Кесслера;
- оцінити ефективність запропонованої системи керування.

Для виконання поставлених завдань у роботі використано методи математичного моделювання, теорії автоматичного керування, аналізу динамічних систем, комп'ютерного моделювання та технічного проектування. Метод математичного моделювання застосовано для опису динаміки елементів системи керування та синтезу передавальних функцій. Методи теорії автоматичного керування використано для аналізу стійкості системи та налаштування регуляторів. Комп'ютерне моделювання у середовищі MATLAB дозволило оцінити якість перехідних процесів та дослідити характеристики системи при різних типах регуляторів. Для розробки структурних, функціональних та монтажних схем використано сучасні CAD-системи та програмні засоби конфігурації промислового обладнання.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Елементами наукової новизни отриманих результатів є вдосконалення структури автоматизованої системи керування насосною станцією оборотного водопостачання шляхом комплексного застосування програмованого логічного контролера.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої системи автоматизації для модернізації існуючих насосних станцій промислових підприємств. Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити надійність роботи насосного обладнання, зменшити витрати електроенергії, забезпечити захист від аварійних режимів та покращити умови експлуатації системи. Результати роботи можуть бути використані під час проєктування автоматизованих систем керування насосними установками у гірничо-збагачувальній, металургійній та інших галузях промисловості.

Бакалаврська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 56 сторінок, кількість рисунків – 35, таблиць – 5, використаних джерел – 12.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

1.1 Призначення насосної станції оборотного водопостачання та суть процесу

Насосна станція оборотного водопостачання призначена для повернення охолодженої води, що пройшла через систему охолодження (градирню), назад у технологічний цикл гірничо-збагачувального комбінату. Реалізація замкнутого циклу циркуляції дозволяє суттєво скоротити загальне водоспоживання, знижує навантаження на природні вододжерела та забезпечує стійкі умови функціонування технологічного обладнання. У зв'язку з експлуатацією станції в умовах запиленого та агресивного виробничого середовища, у проекті передбачено застосування обладнання, що володіє високим ступенем надійності та стійкості до абразивного зносу. Ключовим елементом станції є шламовий насос марки ROITECH, призначений для перекачування забрудненої води, що містить зважені тверді частинки і має підвищену в'язкість. Насос приводиться в дію від потужного асинхронного електродвигуна номінальною потужністю 630 кВт, що зумовлено необхідністю транспортування значних обсягів рідини – до 2500 м³/год – в умовах підвищеного опору. Застосування електроприводу, що регулюється, дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи насоса, знизити пускові струми і підвищити загальну енергоефективність станції. Вода, що повертається з виробничого циклу, надходить у приймальний резервуар, звідки через систему фільтрації прямує повторне використання. На етапі фільтрації видаляються великі механічні включення, які можуть спричинити пошкодження насосного обладнання та знизити його експлуатаційні характеристики. Це дозволяє суттєво збільшити термін служби основних елементів системи та підвищити її надійність.

Охолодження води здійснюється в градирні, де рахунок теплообміну з навколишнім повітрям відбувається зниження температури до необхідних значень. Далі охолоджена вода накопичується в резервуарі і подається у виробничий процес. Трубопровідна мережа станції обладнана зворотними клапанами, що запобігають виникненню гідравлічних ударів та забезпечують захист від зворотного потоку рідини. Вся арматура та елементи трубопроводу виготовляються з матеріалів, стійких до корозії та абразивного зношування, що суттєво збільшує їх термін служби та знижує витрати на технічне обслуговування.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проектом передбачено резервування насосного обладнання, що дозволяє зберігати працездатність системи у разі відмови одного з агрегатів або під час проведення регламентних робіт. Крім того, у схемі передбачено запірну арматуру, байпасні ділянки та дренажні лінії, що дозволяють гнучко регулювати режими роботи та забезпечувати безпечну експлуатацію насосної станції в різних умовах. Таким чином, проектувана система оборотного водопостачання відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації та еколого-енергетичної ефективності, забезпечуючи стабільну, надійну та довговічну роботу у складі гірничо-збагачувального підприємства. Креслення технологічної схеми наведено на рисунку 1.1 [1].

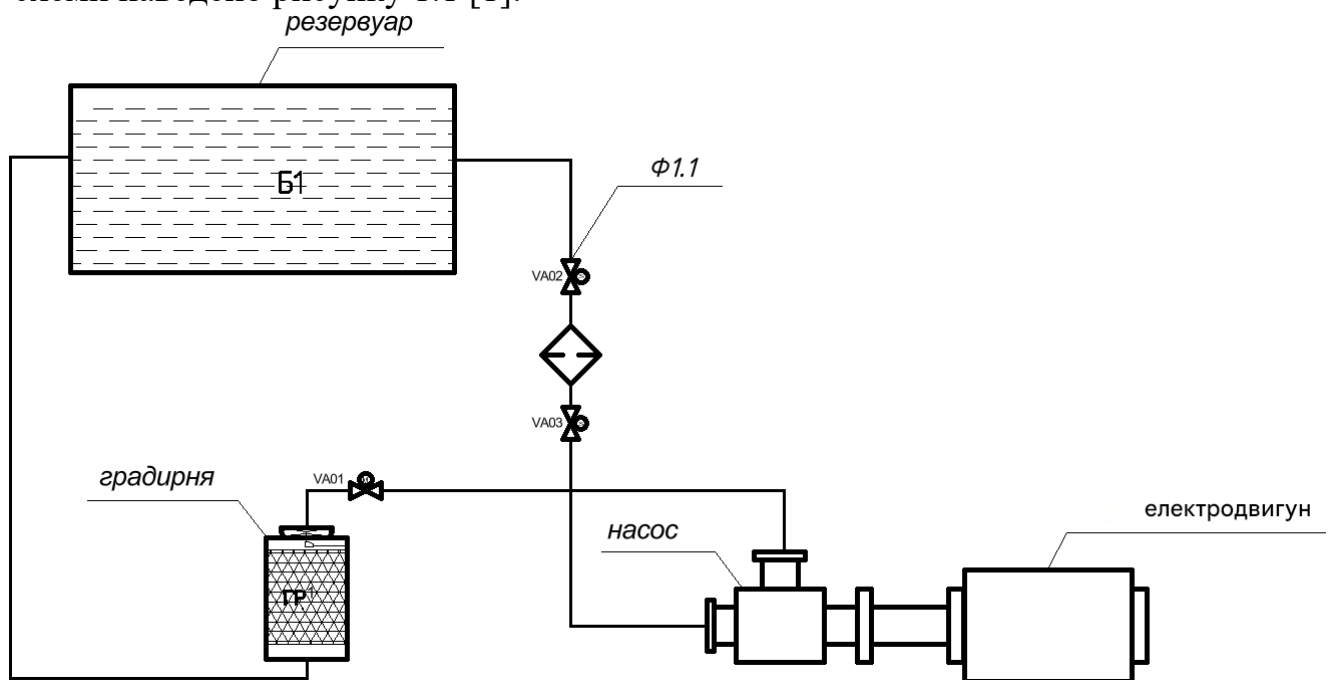


Рисунок 1.1 – Технологічна схема автоматизації

1.2 Функціональне призначення насосної станції у системі оборотного водопостачання

Насосна станція оборотного водопостачання, що розглядається в рамках даного дипломного проекту, є найважливішим елементом технологічної інфраструктури, що забезпечує безперервність та стійкість виробничого циклу. Її основне функціональне призначення полягає у транспортуванні технічної води, повернутий з виробничих контурів після використання, назад у зону технологічного застосування.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Таким чином, формується замкнутий цикл водопостачання, що дозволяє суттєво скоротити споживання природних водних ресурсів, знизити навантаження на системи очищення стічних вод та забезпечити стабільні параметри роботи обладнання.

В умовах промислових об'єктів, особливо за наявності забрудненої або абразивної рідини, пред'являються підвищені вимоги до надійності та енергоефективності насосного обладнання. Вода, що перекачується, часто містить значну кількість твердих частинок, суспензій, а також агресивних хімічних компонентів, що може викликати інтенсивне зношування обладнання.

У зв'язку з цим у складі насосної станції використовується спеціалізований шламовий насос ROITECH, призначений для роботи з високоабразивними рідинами. Він має підвищену стійкість до механічних пошкоджень, здатний розвивати напір до 55 метрів і забезпечує подачу води в об'ємі до 2500 м³/год.

Привід насоса здійснюється від потужного асинхронного електродвигуна потужністю 630 кВт, що забезпечує необхідну продуктивність та надійність в умовах безперервної експлуатації. Інтелектуальне керування насосною станцією реалізовано з використанням частотного перетворювача, що дозволяє плавно регулювати частоту обертання електродвигуна в залежності від поточних умов. Такий підхід дозволяє досягати двох основних цілей: підтримання заданого рівня тиску в системі та оптимізація енергоспоживання. Частотне регулювання виключає різкі пуски та зупинки, знижуючи навантаження на механічні та електричні вузли обладнання, що позитивно позначається на їхній довговічності.

Керуюча дія формується відповідно до показань датчиків тиску, сигнали від яких надходять на програмований логічний контролер, що аналізує поточні параметри і приймає рішення про включення насоса і рівень його регулювання. Вся система побудована на принципах адаптивного управління із зворотним зв'язком.

Контролер забезпечує як збір і обробку інформації від сенсорів, а й автоматичне реагування на відхилення параметрів від встановлених значень. У разі виходу тиску за допустимі межі, система переходить в аварійний режим, відключає насос і формує сигнал тривоги. Передбачено можливість ручного та автоматичного скидання аварій, а також поновлення роботи після стабілізації параметрів. Трубопровідна частина насосної станції оснащена всіма необхідними елементами: фільтрами, зворотними клапанами, запірною арматурою та дренажними пристроями.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це дозволяє забезпечити як нормальну експлуатацію у різних режимах, а й можливість проведення технічного обслуговування без зупинки всієї системи. Також реалізовано схему резервування, що дозволяє перемикатися на запасний насос у разі виходу з ладу основного агрегату. Таким чином, насосна станція, розроблена в рамках проекту, є сучасним, надійним і адаптивним рішенням для підтримки стабільного водного режиму в умовах промислового об'єкта. Її функціональне призначення полягає у транспортуванні води, а й у інтелектуальній підтримки заданих технологічних параметрів, що досягається рахунок застосування частотного регулювання, ПЛК–управління і засобів промислової автоматизації.

1.3 Аналіз технологічної схеми насосної станції оборотного водопостачання

Структурна схема автоматизації насосної станції оборотного водопостачання показує, як організований обмін інформацією між основними елементами системи та як вони взаємодіють у часі. На рівні первинних вимірювань працюють аналогові датчики: рівня в резервуарі, тиску в напірному трубопроводі, температури та електромагнітний витратомір, що вимірює об'єм води. Всі ці сигнали надходять на аналогові входи контролера, де перетворюються на цифрову форму і передаються на обробку. Стан запірної арматури, включаючи вхідні та вихідні клапани, відстежується за допомогою дискретних датчиків положення. Вони підключені до дискретних входів контролера і забезпечують точну інформацію про те, чи відкритий чи закритий кожен клапан, що критично важливо для коректної роботи всієї системи.

Управління виконавчими пристроями – клапанами, електроприводами та іншим обладнанням – здійснюється через дискретні виходи контролера. Він формує керуючі сигнали відповідно до заданого алгоритму.

Наприклад, при підвищенні рівня рідини до певної позначки автоматично подається сигнал відкриття дренажного клапана. Частотний перетворювач, розташований в окремій шафі управління, з'єднаний з контролером протоколу Modbus TCP. Через нього передаються команди регулювання швидкості електродвигуна насоса і повертається інформація про поточний стан перетворювача – струм, напруга, частота обертання, сигнали діагностики. Така архітектура підвищує надійність обміну та дозволяє інтегрувати систему до SCADA.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналогові виходи контролера поки що не використовуються, але передбачені на майбутнє - для підключення виконавчих механізмів з аналоговим управлінням або для зв'язку з іншими ділянками технологічного ланцюга. Центром усієї схеми є процесорний модуль контролера.

Саме він обробляє всі сигнали, що надходять, реалізує ПД-регулятори за рівнем і тиском, виконує логічні функції, відповідає за перемикання між ручним і автоматичним режимами, а також за обробку аварійних сигналів і включення захисту.

Така структура робить систему управління надійною, гнучкою та зручною для подальшої модернізації. Вона відповідає промисловим вимогам щодо швидкодії, точності та стійкості, забезпечуючи стабільну роботу насосної станції навіть за мінливих умов та навантажень. Структурна схема автоматизації зображено рисунку 1.2.

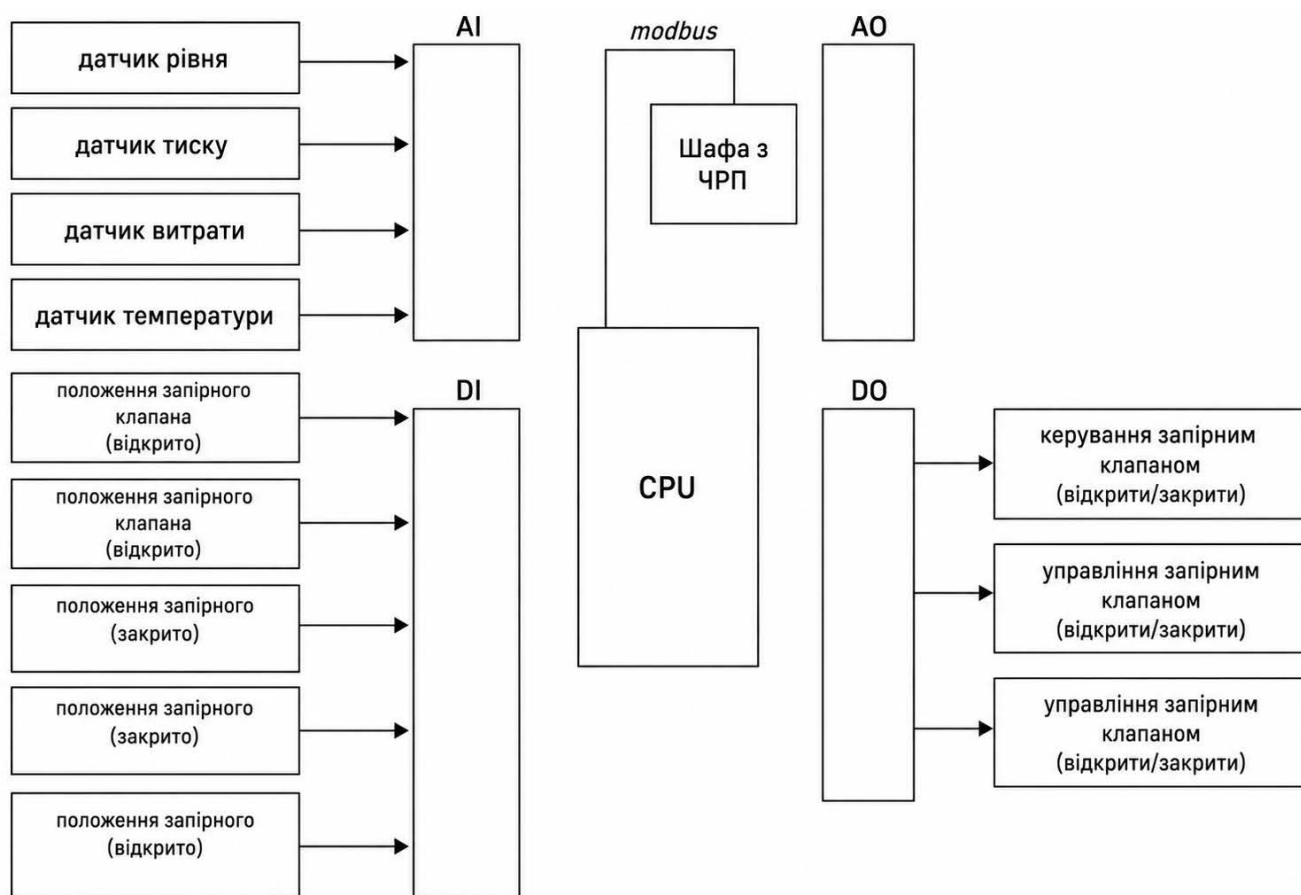


Рисунок 1.2 – Структурна схема автоматизації

1.4 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання

В рамках автоматизованої системи насосної станції оборотного водопостачання особлива увага приділяється організації точок контролю, керування та аварійної сигналізації. Ці елементи становлять основу стійкого функціонування устаткування, своєчасного реагування зміни технологічних параметрів і запобігання аварійних ситуацій. Контрольні точки призначені для безперервного відстеження таких показників, як рівень рідини в резервуарах, тиск у трубопроводах, температура та витрата води. Отримані дані передаються в контролер, де проходять обробку та порівняння із заданими допустимими діапазонами. Це дозволяє оперативно виявляти відхилення та коригувати роботу обладнання без втручання оператора.

Для наочності таблиці 1.1 представлений повний перелік всіх задіяних точок контролю, управління та сигналізації.

Таблиця 1.1 – Визначення точок контролю

Тип точки	Назва параметра	Діапазон значень
контроль	Частота обертання двигуна	0–50 Гц
	Рівень рідини у резервуарі	0–95 %
	Тиск на виході насоса	2–10 бар
	Витрата води	300–500 м³/ч
	Температура води, що перекачується	0–40 °C
	Положення клапана №1	Відкритий / Закритий
	Положення клапана №2	Відкритий / Закритий
управління	Відкриття/закриття клапана №1	Команда з контролера
	Відкриття/закриття клапана №2	Команда з контролера
сигналізація	Тиск нижче допустимого мінімуму	<1,5 бар
	Перепоповнення резервуара	>95 % рівня
	Сухий хід насоса (нульова витрата при увімкненому двигуні)	Витрата < 50 м³/ч при ввімкненому ПЧ

Керуючі точки забезпечують безпосередній вплив на виконавчі механізми: відкриття або закриття клапанів, увімкнення насосів, перемикання режимів роботи. Такі сигнали формуються з урахуванням алгоритму, закладеного в програмований логічний контролер, і дозволяють гнучко адаптувати систему під поточні виробничі умови.

Висновки до розділу

У першому розділі бакалаврської роботи проведено аналіз технологічного процесу насосної станції оборотного водопостачання як об'єкта автоматизації.

Розглянуто принцип роботи системи оборотного водопостачання, функціональне призначення насосної станції та особливості її експлуатації в умовах промислового підприємства.

Виконано аналіз технологічної та структурної схем автоматизації, визначено основні елементи системи, канали обміну інформацією та принципи взаємодії між датчиками, програмованим логічним контролером і виконавчими механізмами.

У розділі обґрунтовано вибір параметрів контролю, регулювання та аварійної сигналізації, визначено точки контролю технологічних параметрів, зокрема рівня, тиску, температури та витрати води.

Також розглянуто принципи керування запірною арматурою та частотно-регульованим електроприводом насоса.

На основі проведеного аналізу сформовано вимоги до автоматизованої системи керування насосною станцією оборотного водопостачання.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації

Система оборотного водопостачання є невід'ємною частиною виробничого циклу, оскільки забезпечує транспортування, охолодження та повторне використання технічної води, що дозволяє зменшити споживання природних водних ресурсів і підвищити екологічну ефективність виробництва.

Насосна станція працює в умовах змінних навантажень та складного технологічного середовища, де рідина може містити абразивні домішки, механічні включення та агресивні компоненти. Це створює підвищені вимоги до надійності, точності та швидкодії системи керування. Відхилення параметрів тиску, рівня або витрати води від заданих значень можуть призвести до порушення технологічного режиму, перевантаження обладнання, виникнення аварійних ситуацій та збільшення енергоспоживання.

Автоматизація насосної станції дозволяє забезпечити безперервний контроль основних технологічних параметрів, реалізувати адаптивне керування насосним обладнанням, своєчасно реагувати на аварійні ситуації та підтримувати стабільний режим роботи системи. Використання програмованого логічного контролера та частотного перетворювача забезпечує плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна насоса, зменшення пускових струмів, підвищення енергоефективності та зниження зношування обладнання.

Таким чином, насосна станція оборотного водопостачання є доцільним об'єктом автоматизації, оскільки її ефективна робота безпосередньо впливає на надійність технологічного процесу, економічність виробництва та безпечну експлуатацію обладнання.

2.2 Визначення характеристик об'єкта автоматизації

Для опису динаміки системи автоматичного регулювання було обрано типові передавальні функції, що відображають фізичні характеристики та функціональне призначення кожного елемента. Частотно-регульований привід (ЧРП), що виконує функції регулюючого органу, представлений апроксимованою інерційною моделлю першого порядку, що дозволяє врахувати затримку у формуванні вихідного сигналу при зміні впливу, що управляє.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Асинхронний електродвигун, що виконує роль виконавчого механізму, описаний як коливальна ланка другого порядку з характерними параметрами інерційності та демпфування.

Для забезпечення ефективного функціонування автоматизованої системи керування насосною станцією оборотного водопостачання необхідно виконати математичне моделювання та ідентифікацію об'єкта керування. Математична модель дозволяє описати динамічні властивості системи, провести аналіз її поведінки при різних режимах роботи, оцінити стійкість та виконати синтез регулятора.

Об'єктом керування у даній роботі є насосна станція оборотного водопостачання, основним регульованим параметром якої є тиск на виході насосної установки. Керуючим впливом виступає частота обертання електродвигуна, що змінюється за допомогою частотного перетворювача.

Математичне моделювання системи виконувалося шляхом представлення її окремих елементів у вигляді типових динамічних ланок із відповідними передавальними функціями. Такий підхід дозволяє спростити аналіз складного технологічного процесу та забезпечує можливість подальшого синтезу системи автоматичного регулювання.

До складу моделі входять: частотний перетворювач; асинхронний електродвигун; насосний агрегат із трубопровідною системою.

Об'єкт керування — система перекачування рідини насосної станції оборотного водопостачання — представлений передавальною функцією третього порядку, отриманою в результаті ідентифікації за перехідною характеристикою. Ідентифікація виконувалась шляхом аналізу реакції системи на одиничний ступінчастий вплив із подальшою апроксимацією експериментальних даних у середовищі MATLAB.

Отримана модель враховує інерційність насосного агрегату, гідравлічні процеси у трубопровідній мережі та вплив динаміки потоку рідини на зміну тиску в системі. Використання моделей різного порядку для окремих компонентів системи дозволяє більш точно описати динамічну поведінку об'єкта керування при збереженні аналітичної простоти, необхідної для подальшого синтезу регулятора, аналізу стійкості та дослідження показників якості перехідних процесів.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Передатна функція регулюючого органу (2.1).

$$G(s) = \frac{1}{0.1s + 1}. \quad (2.1)$$

Передатна функція виконавчого механізму (асинхронний двигун) (2.2).

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 3s + 4}. \quad (2.2)$$

Передатна функція об'єкта керування (2.3)

$$G(s) = \frac{2.459}{4.475s^3 + 8.532s^2 + 4.405s + 1}. \quad (2.3)$$

Повна передатна функція розімкнутої системи визначається послідовним з'єднанням передавальних функцій всіх ланок: регулюючого органу (ЧРП), виконавчого механізму (асинхронного двигуна) та об'єкта управління (системи перекачування рідини). Таке послідовне з'єднання дозволяє отримати узагальнену математичну модель, що описує поведінку всієї системи в розімкнутому контурі. Ця модель необхідна щодо аналізу стійкості, розрахунку показників якості регулювання, і навіть для синтезу оптимального регулятора.

$$G(s) = G_{чрп}(s) \cdot G_{дв}(s) \cdot G_{об}(s). \quad (2.4)$$

$$G(s) = \frac{2.459}{0.0044s^6 + 0.12s^5 + 1.09s^4 + 4.85s^3 + 9.890s^2 + 4.60s + 1} \quad (2.5)$$

$$T(s) = \frac{2.459}{0.0044s^6 + 0.12s^5 + 1.09s^4 + 4.85s^3 + 9.890s^2 + 4.60s + 3.459}$$

де $G(s)$ – передатна функція розімкнутої системи;

$T(s)$ – передавальна функція замкнутої системи.

Була побудована перехідна характеристика замкнутої системи, представлена на рисунку 2.1. Аналіз отриманого графіка показує, що система є стійкою: при одиничному стрибкоподібному впливі вихідна величина прагне до значення без нескінченного зростання або розбіжності. Наявність коливань на початку відгуку свідчить про наявність динамічних ланок другого та третього порядку, проте надалі система стабілізується, що підтверджує її здатність до самовідновлення після обурення та коректної роботи в рамках заданої моделі.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

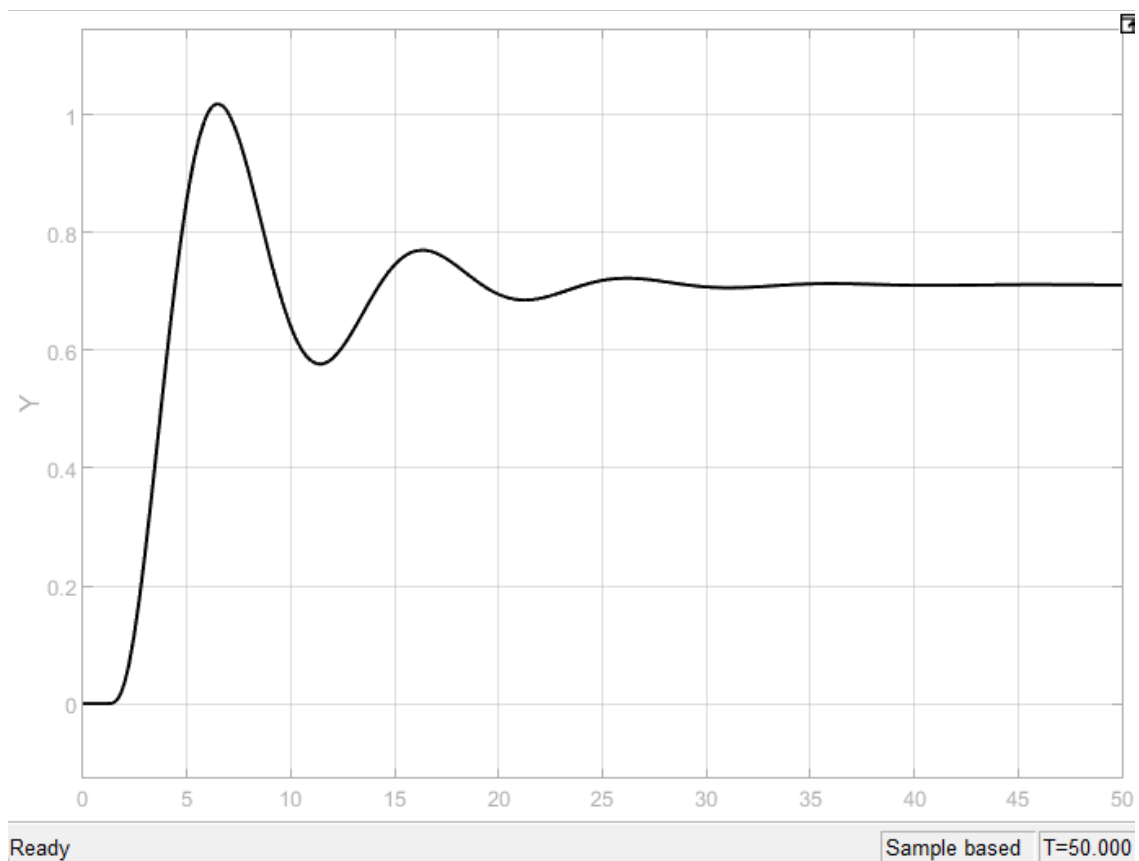


Рисунок 2.1 – Перехідна характеристика

Отримавши значення прямих оцінок якості перехідних процесів замкнутої системи, проведемо аналіз показників якості регулювання. До основних показників належать час регулювання, перерегулювання, кількість коливань, коливальність, час наростання та усталена похибка. Аналіз цих параметрів дозволяє оцінити ефективність роботи системи автоматичного керування та визначити необхідність подальшого налаштування регулятора (рис.2.2).

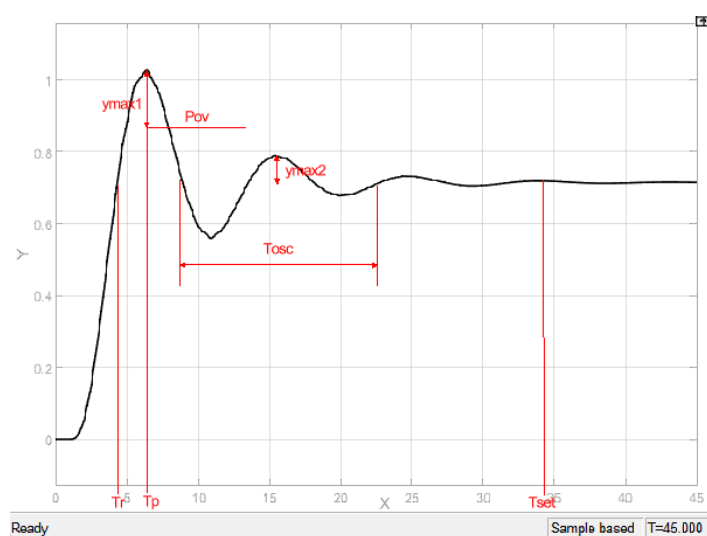


Рисунок 2.2 – Прямі показники якості перехідного процесу замкнутої системи

За результатами моделювання встановлено, що замкнута система є стійкою, оскільки перехідний процес має затухаючий характер і вихідний параметр із часом досягає сталого значення.

Разом з тим спостерігається значне перерегулювання та наявність коливань на початковому етапі перехідного процесу, що свідчить про недостатню якість регулювання без застосування оптимально налаштованого регулятора.

Час регулювання системи становить 31,9 с, що характеризує тривалість виходу системи на усталений режим роботи.

Перерегулювання досягає 50 %, що є досить великим значенням і може негативно впливати на стабільність технологічного процесу та роботу насосного обладнання. Кількість коливань у перехідному процесі становить три, що підтверджує наявність коливального характеру системи.

Усталена похибка системи становить 0,4, що свідчить про відхилення вихідного параметра від заданого значення у сталому режимі.

Наявність такої похибки вказує на необхідність використання регулятора, здатного забезпечити точніше підтримання тиску у системі.

Таблиця 2.1 – Аналіз показників якості

№	Показники якості	Позначення	Значення
1	Час регулювання	T_{set}	31.9с
2	Перерегулювання	P_{ov}	50%
3	Кількість коливань	M	3
4	Коливальність	μ	1.3
5	Частота коливань	T_{osc} ω_{osc}	$T_{osc}=8.8$ $\omega_{osc}=0.7$
6	Час наростання	T_r	$T_r=3$
7	Усталена похибка	e_{ss}	$e_{ss}=0.4$

Проведений аналіз показує, що початкова система без регулятора не забезпечує необхідних показників якості керування, тому для покращення динамічних характеристик необхідно виконати синтез та налаштування регулятора.

Основними напрямками покращення є зменшення перерегулювання, скорочення часу регулювання, зниження коливальності та мінімізація усталеної похибки.

Висновки до розділу

У другому розділі бакалаврської роботи виконано математичне моделювання та ідентифікацію об'єкта керування насосної станції оборотного водопостачання. Проведено обґрунтування вибору насосної станції як об'єкта автоматизації з урахуванням вимог до надійності, енергоефективності та стабільності технологічного процесу.

У розділі визначено основні динамічні характеристики системи та сформовано математичні моделі окремих елементів системи керування. Для опису роботи частотно-регульованого приводу використано інерційну модель першого порядку, асинхронний електродвигун представлено коливальною ланкою другого порядку, а система перекачування рідини описана передавальною функцією третього порядку, отриманою в результаті ідентифікації за перехідною характеристикою у середовищі MATLAB.

На основі передавальних функцій окремих елементів отримано повну передавальну функцію розімкнутої та замкнутої систем автоматичного керування. Побудовано перехідну характеристику замкнутої системи та проведено аналіз її стійкості. Визначено основні прямі показники якості регулювання, зокрема час регулювання, перерегулювання, кількість коливань, коливальність, час наростання та усталену похибку.

За результатами аналізу встановлено, що система є стійкою, проте має значне перерегулювання та коливальний характер перехідного процесу, що обґрунтовує необхідність подальшого синтезу та налаштування регулятора для покращення динамічних характеристик системи автоматичного керування.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1 Синтез одноконтурної системи автоматичного керування

З технічного завдання необхідно синтезувати один контур управління для автоматизованої насосної станції оборотного водопостачання. Метою є стабілізація тиску на виході насосної установки відповідно до заданого значення. Контур автоматичного регулювання тиском у системі керування насосною станцією зображено на рисунку 3.1.

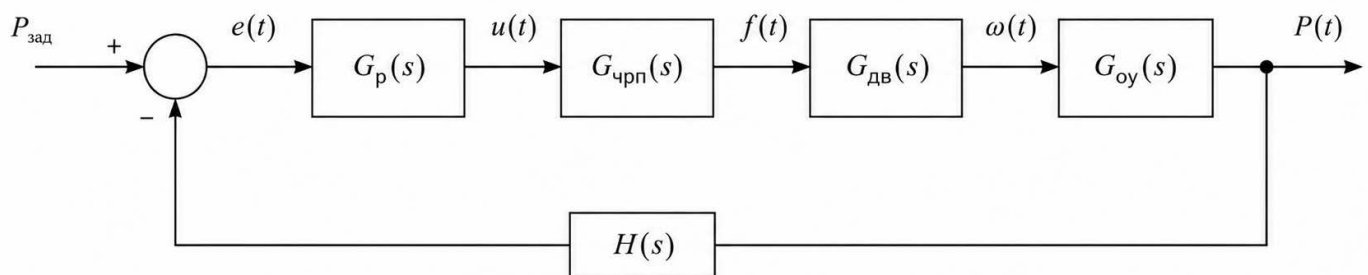


Рисунок 3.1 – Структурна схема контуру автоматичного регулювання тиску в системі керування насосною станцією

Тут:

$P_{\text{зад}}$ — задане значення тиску;

$e(t)$ — сигнал помилки регулювання;

$u(t)$ — керуючий сигнал регулятора;

$f(t)$ — частота живлення від частотного перетворювача;

$\omega(t)$ — кутова швидкість обертання двигуна;

$P(t)$ — вихідний сигнал системи (тиск на виході насосної установки);

$G_p(s)$ — передавальна функція регулятора;

$G_{\text{чрп}}(s)$ — передавальна функція частотного перетворювача;

$G_{\text{дв}}(s)$ — передавальна функція асинхронного електродвигуна;

$G_{\text{оу}}(s)$ — передавальна функція об'єкта керування;

$H(s)$ — передавальна функція датчика тиску (ланка зворотного зв'язку).

Відповідно до технічного завдання необхідно виконати синтез одноконтурної системи автоматичного керування насосною станцією оборотного водопостачання. Основною метою синтезу є забезпечення стабілізації тиску на виході насосної установки шляхом автоматичного регулювання частоти обертання електродвигуна насоса.

Система автоматичного керування побудована за принципом замкнутого контуру із від'ємним зворотним зв'язком.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Регульованим параметром є тиск у напірному трубопроводі, а керуючим впливом — сигнал керування частотним перетворювачем, що змінює швидкість обертання асинхронного електродвигуна.

До складу одноконтурної системи автоматичного керування входять:

- задаючий пристрій;
- регулятор;
- частотний перетворювач;
- асинхронний електродвигун;
- насосний агрегат;
- датчик тиску;
- ланка зворотного зв'язку.

Принцип роботи системи полягає у безперервному порівнянні заданого значення тиску з поточним значенням, отриманим від датчика тиску.

У результаті порівняння формується сигнал помилки регулювання, який надходить на регулятор.

Регулятор формує керуючий сигнал для частотного перетворювача, який змінює частоту живлення електродвигуна та відповідно продуктивність насосної установки.

3.2 Синтез ефективної системи автоматичного керування

Для забезпечення необхідної якості регулювання у роботі необхідно використати регулятор, який дозволить зменшити усталену похибку, скоротити час регулювання та підвищити стійкість системи.

Для налаштування параметрів регулятора використаємо методи Зіглера–Ніколса та подальшу оптимізацію параметрів за результатами моделювання.

Використаємо алгоритм синтезу типових регуляторів з урахуванням ZN2.

Крок 1. Додамо до схеми Р-регулятор з невідомим параметром K_{cr} .

Крок 2. Отримаємо передатну функцію замкнутої системи:

$$T(s) = \frac{2.459K_{cr}}{0.004s^6 + 0.12s^5 + 1.09s^4 + 4.8s^3 + 9.89s^2 + 4.6s + 1 + 2.459K_{cr}} \quad (3.1)$$

Крок 3. Визначимо K_{cr} відповідно до критерію Гурвіца.

За критерієм Гурвіца система втрачає стійкість, коли визначник одного з мінорів дорівнює нулю (рис.3.2).

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

syms K
% Коефіцієнти характеристичного багаточлена замкнутої системи
a0 = 0.984475;
a5 = 0.123298;
a4 = 1.092005;
a3 = 4.854807;
a2 = 9.893959;
a1 = 4.604313;
aR = 1 - 3.459*K;
% Вектор коефіцієнтів
a = [a6 a5 a4 a3 a2 a1 aR];
% Формування матриці Гурвіца п'ятого порядку
Hurwitz=zeros(6); % 6x6 матриця
% Заповнюємо перший рядок непарними коефіцієнтами
H(1,:) = [a6 a4 a2 aR 0 0];
H(2,:) = [a5 a3 a1 0 0 0];
H(3,:) = [0 a6 a4 a2 aR 0];
H(4,:) = [0 a5 a3 a1 0 0];
H(5,:) = [0 0 0 a6 a4 a2 aR 0];
H(6,:) = [0 0 a5 a3 a1 0];
% Сформуємо визначники головних мінорів
D1 = H(1,1);
D2 = det(H(1:2,1:2));
D3 = det(H(1:3,1:3));
D4 = det(H(1:4,1:4));
D5 = det(H(1:5,1:5));
Ds = double(aR);
% Рішення рівняння для K(Ds) = граничний випадок стійкості
Kcr = solve(Ds == 0, K, 'Real', true);
Kcr_double = double(Kcr); % Чисельно
disp('Критичне значення K(σ):')
disp(Kcr)

>> untitled
Критичне значення K (Kcr):

    -0.4067
   -407.6550
    3.0845

```

Рисунок 3.2 – Код у MATLAB для знаходження Kcr

За критерієм Гурвіца система втрачає стійкість, коли визначник одного з мінорів дорівнює нулю. Нас цікавить найменше позитивне значення посилення, у якому це відбувається – і є критичне значення $K_{cr} = 3.0845$

Знайдений граничний коефіцієнт посилення відповідає коливальній межі стійкості.

Крок 4. Побудувати схему моделювання П-регулятора (рис. 3.3).

Крок 5. Знаходимо критичний період з перехідного процесу при $K_{cr} = 3.0845$ (рисунок 3.4).

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

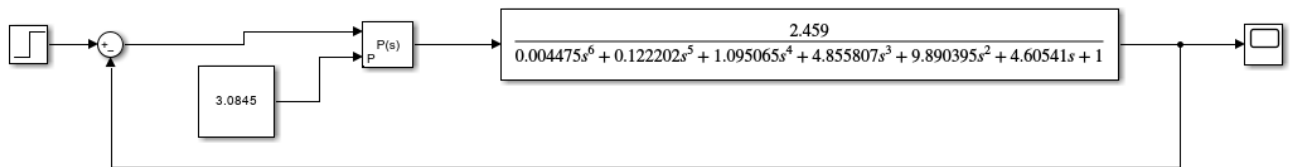


Рисунок 3.3 – Схема моделювання П-регулятора

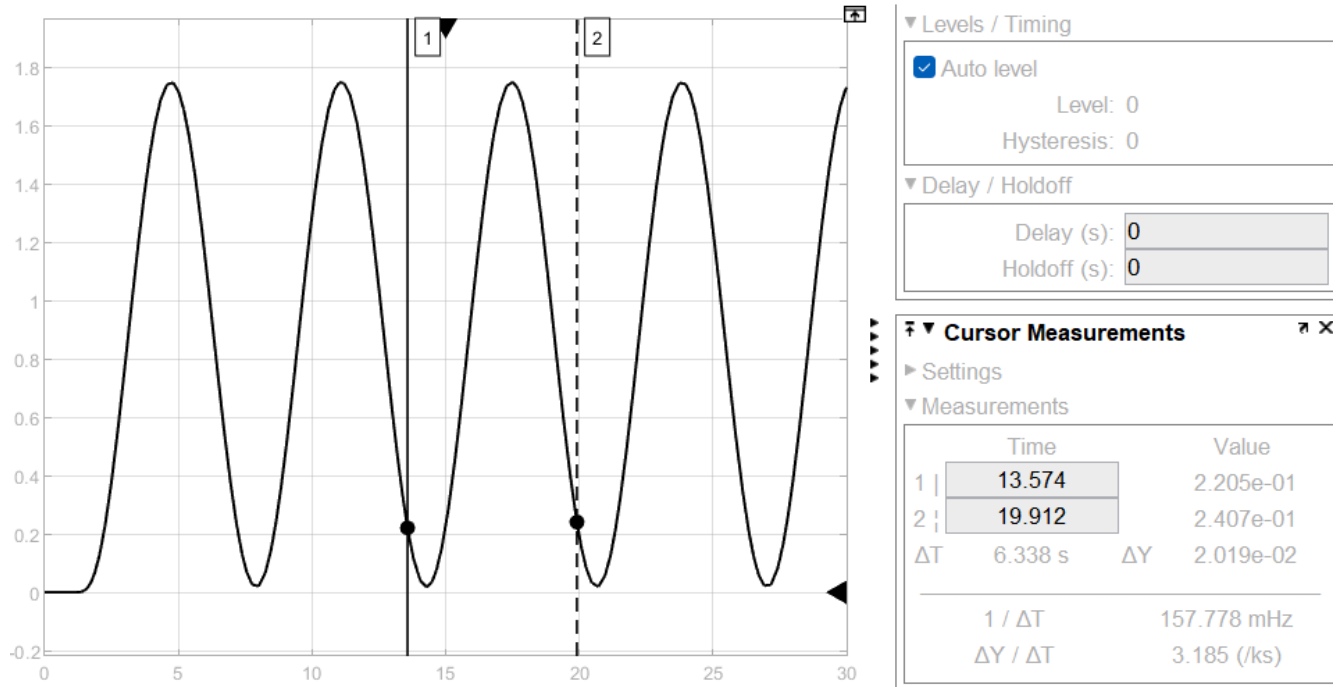


Рисунок 3.4 – Перехідний процес при $K_{cr} = 3.0845$

Отримавши критичний коефіцієнт та період, знаходимо параметри типових регуляторів (таблиця 3.1)

Таблиця 3.1 – Параметри типових регуляторів

Регулятор	K_p	$T_i = \frac{1}{I}$	T_D
P	$0.5 \cdot K_{cr} = 1.542$	—	—
PI	$0.45 \cdot K_{cr} = 1.3878$	$\frac{P_{cr}}{1.2} = 5.2816$	—
PID	$0.6 \cdot K_{cr} = 1.8504$	$\frac{P_{cr}}{2} = 3.169$	$\frac{P_{cr}}{8} = 0.79225$

Промодельюємо систему з отриманими параметрами регуляторів (рис. 3.5).

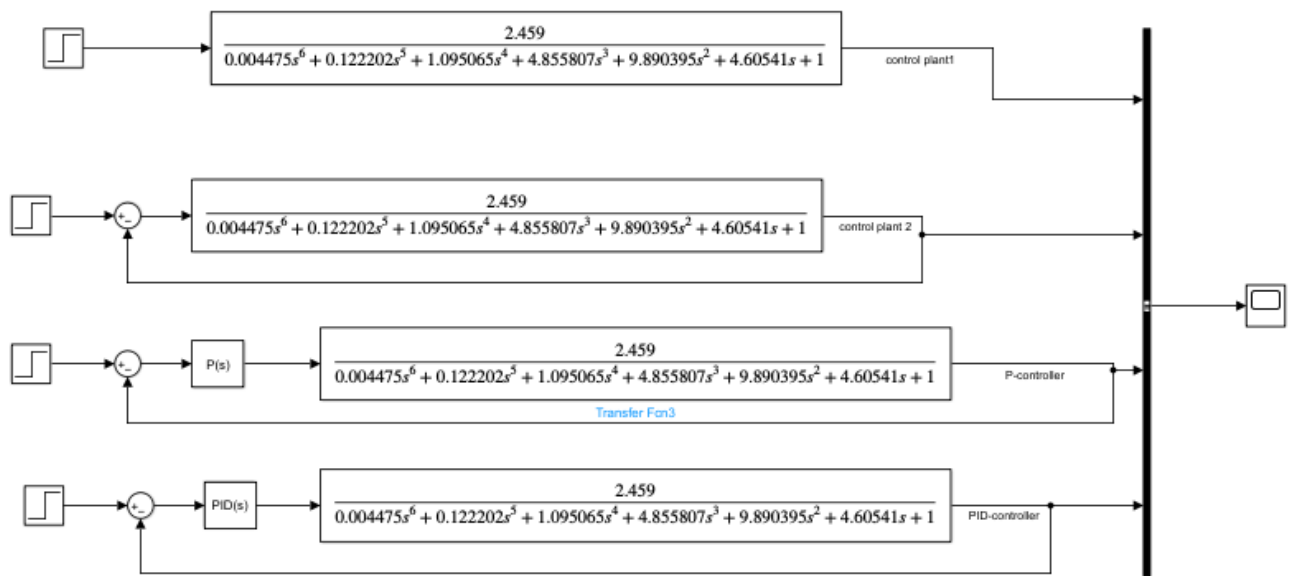


Рисунок 3.5 – Схема розімкнутої та замкнутої системи з різними типами регулятора

Після моделювання систем із типовими регуляторами отримаємо результат перехідних процесів (рисунок 3.6). Отримавши значення прямих оцінок якості з перехідних процесів замкнутої системи, системи з PID – регулятором, зробимо аналіз оцінок якості та порівняємо їх (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 - Аналіз показників якості

№	Показник якості	Позначення	Значення
1	Час регулювання	Tset	31.9с
2	Перерегулювання	Pov	50%
3	Кількість коливань	M	3
4	Коливальність	μ	1.3
5	Частота коливань	Tosc ω_{osc}	Tosc =8.8 $\omega_{osc}=0.7$
6	Час наростання	Tr	Tr =3
7	Усталена похибка	e _{ss}	e _{ss} =0.4

За методом Циглера-Нікольса №2 PID-регулятор видає найбажаніші результати, час регулювання покращився, перерегулювання зменшилося до 10%, зменшився час наростання і практично відсутня коливність.

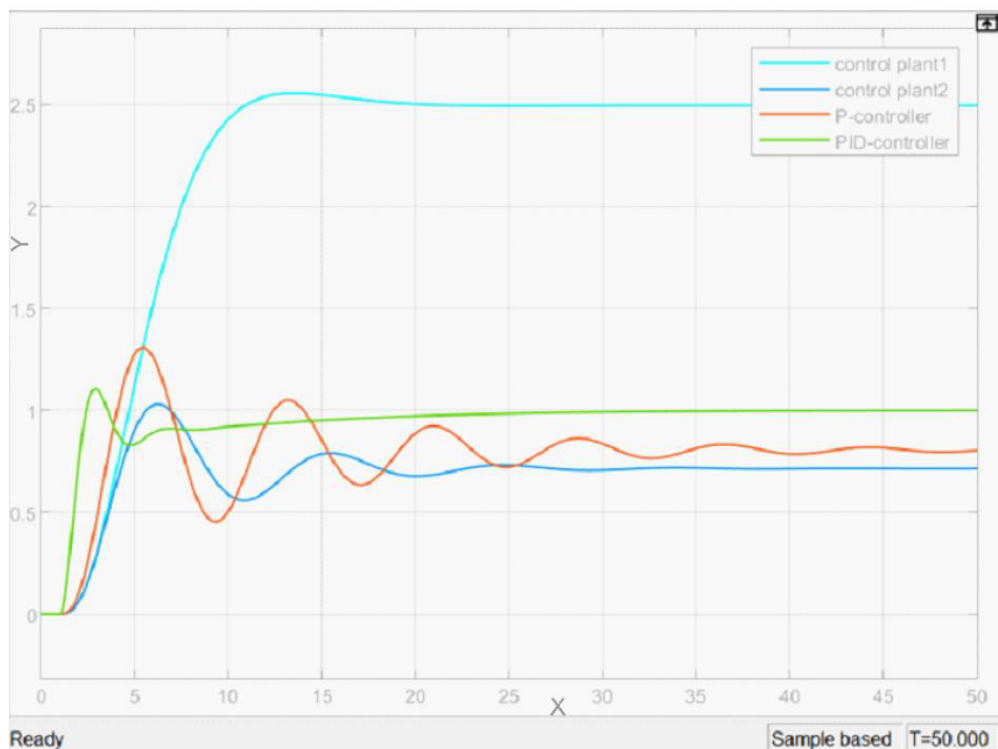


Рисунок 3.6 – Перехідні процеси ЗСАР із типовими регуляторами

Таблиця 3.3 – Аналіз показників якості

№	Оцінка якості	Позначення	Замкнута система без регулятора	Замкнута система з PID-регулятором
1	Час регулювання	T_{set}	31.9с	20с
2	Перерегулювання	P_{ov}	50%	10%
3	Число коливань	M	3	2
4	Коливання	μ	1.3	1.3
5	Частота коливань	T_{osc} ω_{osc}	8.8 0.7	6.2 1.01
6	Час наростання	T_r	3	2.5

За методом Циглера-Нікольса №2 PID-регулятор видає найбажаніші результати, час регулювання покращився, перерегулювання зменшилося до 10%, зменшився час наростання і практично відсутня коливність.

3.3 Налаштування типових регуляторів

Одним із методів аналітичного налаштування параметрів регулятора є метод амплітудного оптимуму, також відомий як метод Кесслера. Цей метод заснований на забезпеченні максимальної смуги пропускання системи управління та використовується у випадках, коли об'єкт управління може бути апроксимований як система з трьома інерційними ланками.

Передатна функція розімкнутої системи керування насосною станцією має вигляд (3.1).

Для застосування методу амплітудного оптимуму цю функцію апроксимують у вигляді добутку трьох послідовних інерційних ланок:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)} \quad (3.2)$$

де K – коефіцієнт передачі;

T_1, T_2, T_3 – постійні часу, упорядковані за величиною.

Для апроксимації динаміки об'єкта управління та подальшого налаштування регулятора методом амплітудного оптимуму була виконана оцінка полюсів розімкнутої передавальної функції (3.1).

Полюси системи були знайдені за допомогою функції `damp()` у середовищі MATLAB, що дозволяє визначити значення власних частот та коефіцієнтів загасання полюсів системи (рисунок 3.7).

```
>> damp(G)

Pole

-2.71e-01 + 2.47e-01i
-2.71e-01 - 2.47e-01i
-4.40e+00
-3.48e+00 + 3.52e+00i
-3.48e+00 - 3.52e+00i
-1.54e+01
```

Рисунок 3.7 – Результати функції `damp()` для передавальної функції об'єкта управління у MATLAB

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Метод Кесслера працює коректно, коли об'єкт представимо у вигляді добутку трьох інерційних ланок. Тобто, нам потрібно вибрати три полюси, що найбільш впливають, які визначають основну динаміку системи. Зазвичай це найповільніші (тобто ближче до нуля по модулю), тому що вони впливають на перехідний процес.

Полюси системи були використані для апроксимації вихідної передавальної функції (3.5) у вигляді добутку трьох інерційних ланок.

Для речевого полюса постійна часу обчислюється як обернена величина:

$$T_3 = \frac{1}{p_3}, \quad (3.3)$$

$$T_3 = \frac{1}{4.40} \approx 0.227. \quad (3.4)$$

Для комплексно-сполученої пари апроксимація інерційною ланкою відбувається через модуль та реальну частину полюса:

$$T_{1,2} = \frac{1}{|Re(p_{1,2})|}, \quad (3.5)$$

$$T_{1,2} = \frac{1}{0.367} \approx 2.724. \quad (3.6)$$

З урахуванням коефіцієнта передачі $K=2.459$ вихідна передатна функція (3.5) була апроксимована у вигляді добутку трьох інерційних ланок

$$G(s) = \frac{1}{(2.724s + 1)(2.724s + 1)(0.227s + 1)}. \quad (3.7)$$

Для настройки ПИ-регулятора с передаточной функцией:

$$G_{pi}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right). \quad (3.8)$$

Параметри розраховуються за формулами:

$$K_p = \frac{T_2 + T_3}{K \cdot T_1}, \quad (3.9)$$

$$K_p = \frac{2.724 + 0.227}{2.459 \cdot 2.724}. \quad (3.10)$$

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_i = T_2 + T_3, \quad (3.11)$$

$$T_i = 2.724 + 0.227 \approx 2.951. \quad (3.12)$$

3.4 Аналіз роботи розроблених систем автоматичного керування

Промодельюємо систему з отриманими параметрами регуляторів (рис. 3.8).

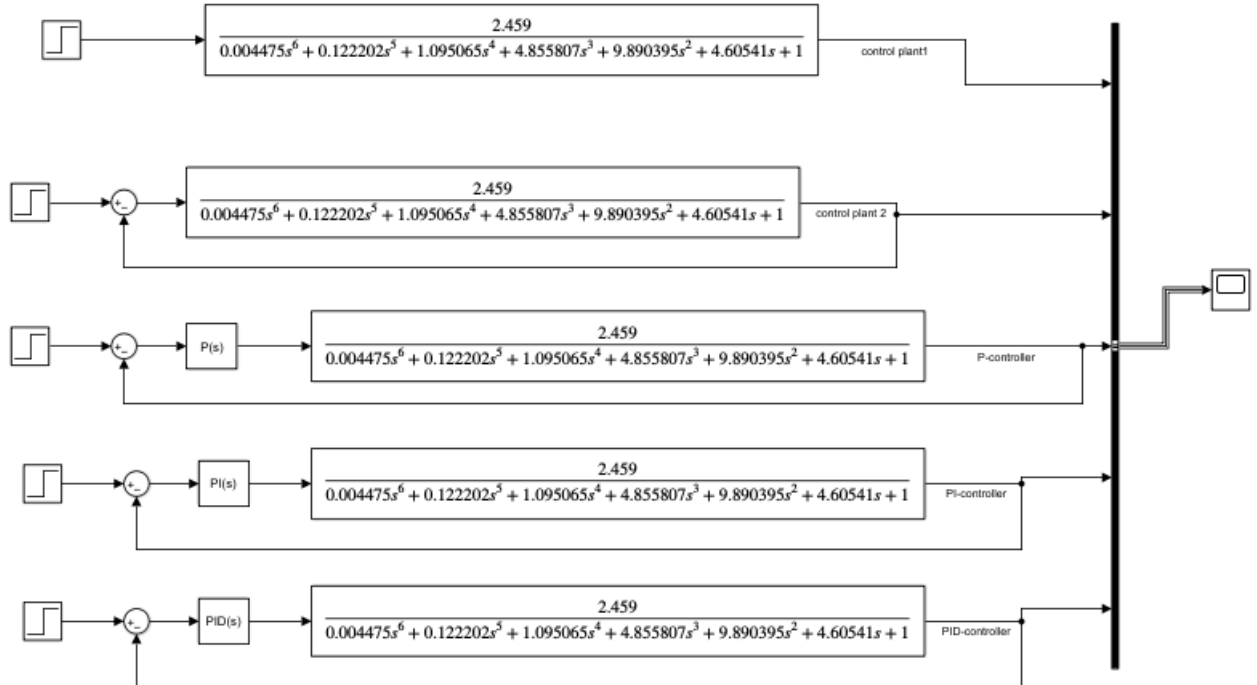


Рисунок 3.8 – Схема розімкнутої та замкнутої системи з різними типами регулятора

Отримаємо перехідні процеси ЗСАР із типовими регуляторами (рис. 3.9)

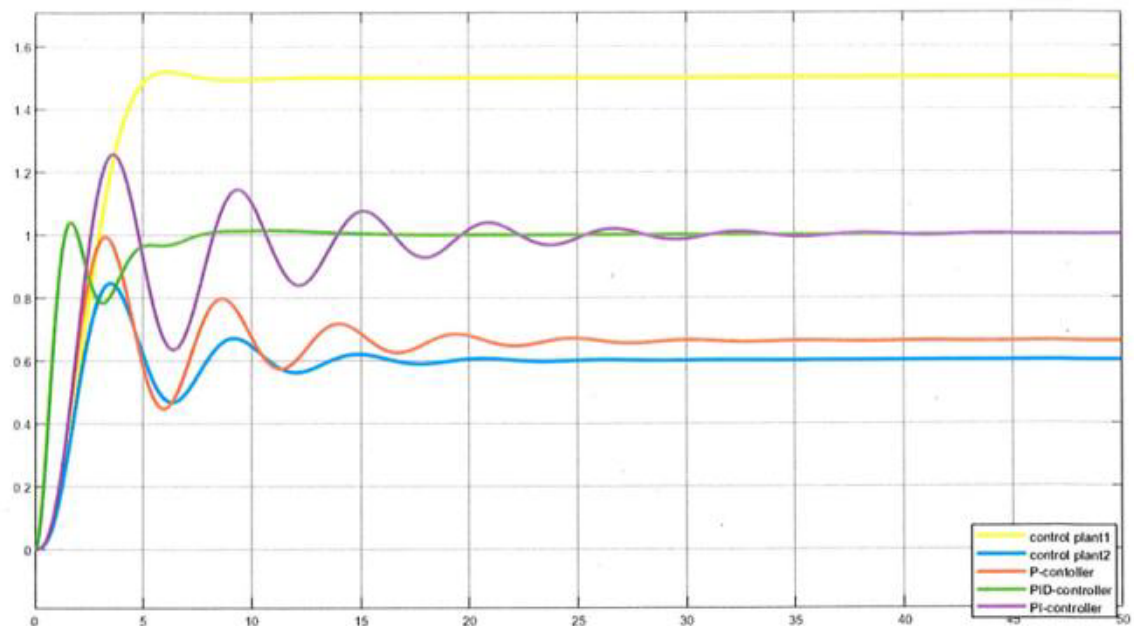


Рисунок 3.9 – Перехідні процеси ЗСАР із типовими регуляторами

В результаті проведеного моделювання різних типів регуляторів з використанням різних методів налаштування було встановлено, що найкращі динамічні характеристики системи автоматичного регулювання насосної станції оборотного водопостачання досягаються при використанні ПД-регулятора, налаштованого за першим методом Зіглера-Ніколса (ZN1).

Висновки до розділу

У третьому розділі бакалаврської роботи виконано синтез одноконтурної системи автоматичного керування насосною станцією оборотного водопостачання. Розроблено структурну схему контуру автоматичного регулювання тиску та визначено склад основних елементів системи, до яких належать регулятор, частотний перетворювач, асинхронний електродвигун, насосний агрегат, датчик тиску та ланка зворотного зв'язку. У розділі розглянуто принцип роботи замкнутої системи автоматичного керування з від'ємним зворотним зв'язком, у якій регульованим параметром є тиск у напірному трубопроводі, а керуючим впливом — сигнал керування частотним перетворювачем. Для синтезу регулятора використано метод Зіглера-Ніколса. Визначено критичний коефіцієнт підсилення системи за критерієм Гурвіца та побудовано математичну модель замкнутої системи з Р-регулятором у середовищі MATLAB. На основі отриманого критичного коефіцієнта та критичного періоду розраховано параметри типових Р-, PI- та PID-регуляторів.

Проведено моделювання систем автоматичного керування з різними типами регуляторів та виконано аналіз перехідних процесів. Визначено основні показники якості регулювання: час регулювання, перерегулювання, кількість коливань, частоту коливань та час наростання. За результатами порівняльного аналізу встановлено, що PID-регулятор забезпечує найкращі показники якості керування, зокрема зменшення перерегулювання, скорочення часу регулювання та покращення динамічних характеристик системи. Також у розділі виконано налаштування регулятора методом амплітудного оптимуму (методом Кесслера). Для цього проведено апроксимацію передавальної функції об'єкта у вигляді трьох послідовних інерційних ланок та визначено параметри PI-регулятора на основі аналізу полюсів системи у середовищі MATLAB. У результаті проведеного синтезу та моделювання встановлено, що найбільш ефективною для автоматичного регулювання тиску насосної станції оборотного водопостачання є система з PID-регулятором, налаштованим методом Зіглера-Ніколса, яка забезпечує високу швидкодію, стійкість та необхідну якість регулювання.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК

4.1 Вибір технічних засобів автоматизації

При виборі вимірювальних приладів враховувалися параметри технологічного середовища, діаметр трубопроводу, температурний режим та інші умови експлуатації. На підставі аналізу було прийнято рішення використовувати електромагнітний витратомір, що забезпечує точний та надійний вимір витрати оборотної води в контурі насосної станції. Електромагнітний витратомір складається із двох основних компонентів – вимірювального сенсора та електронного перетворювача. Принцип дії заснований на законі електромагнітної індукції: при проходженні рідини, що проводить, через магнітне поле в ній індукується напруга, пропорційне швидкості потоку. Сенсор фіксує цю напругу, а перетворювач обробляє сигнал і формує стандартний вихідний аналоговий сигнал (зазвичай 4-20 мА або 0-10 В), що передається на аналоговий вхід програмованого логічного контролера. Конфігурація показана на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Електромагнітний витратомір

Підібраний електромагнітний витратомір SITRANS F M MAG 5100 W 7ME6520-6FC13-2MA1-Z P23 з перетворювачем MAG 6000 CT, що працює без цифрових шин, з аналоговим інтерфейсом та вбудованим дисплеєм. Повна конфігурація пристрою включає датчик з електродами Hastelloy і футеровкою NBR, фланцеве з'єднання EN 1092-1 PN 16 і перетворювач в корпусі IP67.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

В результаті конфігурації був обраний перетворювач тиску SITRANS P320 для встановлення після фільтру в системі зворотного водопостачання (рис.4.2). Пристрій розрахований на вимірювання надлишкового тиску до 16 бар та передає сигнал за аналоговим протоколом HART (4...20 мА).



Рисунок 4.2 – Датчик тиску

Усі елементи, що контактують із середовищем, виконані з нержавіючої сталі 316L, корпус датчика – з литої сталі CF3M. Датчик має двокамерну конструкцію, що підвищує його надійність у промислових умовах.

Було налаштовано ультразвуковий контролер рівня SITRANS LT500 7ML6003-1AB20-1AA2 у виконанні HydroRanger, призначений для вимірювання рівня, об'єму та витрати рідини з використанням ультразвукових перетворювачів (XPS, XRS, STH). Пристрій підтримує одну точку вимірювання, живиться від джерела 12 ... 30 DC, має три релейних виходи (два типи Form A і один Form C), і виконано в панельному виконанні. Контролер оснащений змінною карткою пам'яті microSD на 8 ГБ, а також відповідає промисловим вимогам захисту (General Purpose/ Non-Ex, з сертифікатом EAC). Конфігурація контролера показано рисунку 4.3.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



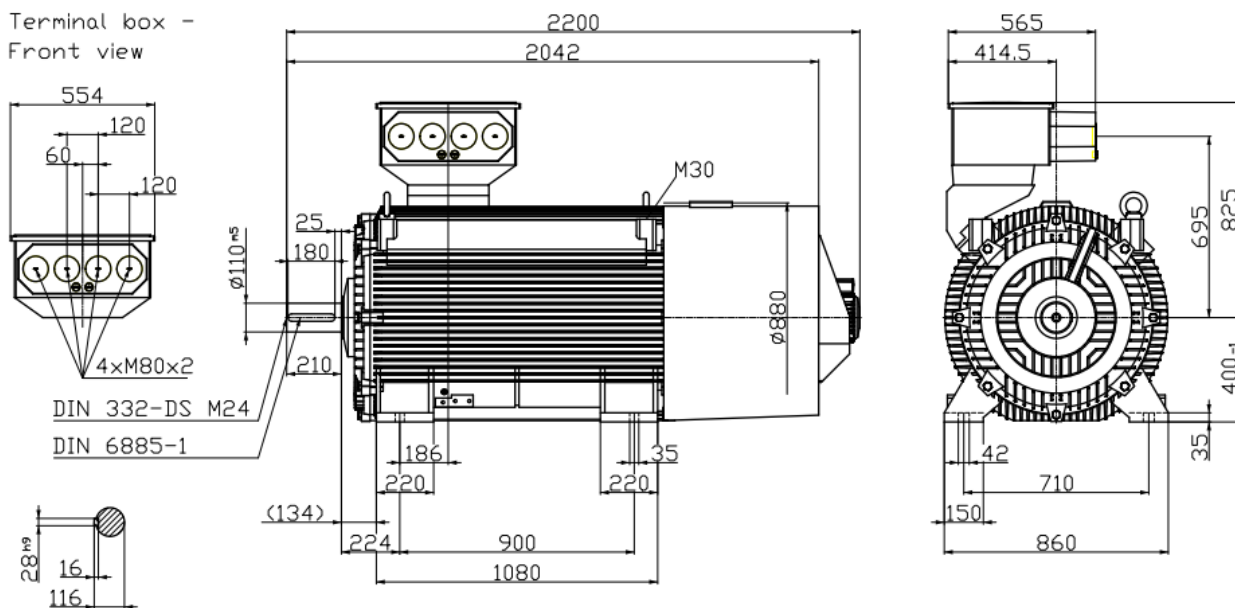
Рисунок 4.3 – Датчик рівня

Обрано датчик температури SITRANS TS100 у виконанні МІС, призначений для контролю температури охолодженої води після градирні. Конфігурація передбачає використання занурювального термоперетворювача опору типу Pt100 з одним елементом виміру. Електричне підключення реалізовано через роз'єм M12x1 зі ступенем захисту IP67, що забезпечує надійність в умовах промислової експлуатації. Пристрій не призначений для використання у вибухонебезпечних зонах (Non-Ex, з сертифікатом EAC). Конфігурація датчика температури представлена рисунку 4.4.



Рисунок 4.4 – Датчик температури

Terminal box -
Front view



У проєкті обраний контролер Modicon M262 від компанії Schneider Electric, призначений для побудови високонадійних і гнучко масштабованих систем автоматизації. Даний контролер забезпечує стабільне керування насосною установкою, а також підтримує широкий спектр промислових комунікаційних протоколів, включаючи Modbus RTU, Modbus TCP, EtherNet/IP та OPC UA, що дозволяє ефективно інтегрувати його із частотним перетворювачем, сенсорами, панелями оператора та іншими елементами системи (рис.4.6).

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з переваг Modicon M262 є його модульна архітектура, що забезпечує можливість розширення конфігурації рахунк підключення додаткових модулів вводу-виводу. Це дозволяє адаптувати контролер до конкретних вимог об'єкта автоматизації без необхідності заміни основного пристрою. У проекті були використані розширювальні модулі введення-виводу, що забезпечують підключення дискретних та аналогових сигналів від технологічних датчиків та виконавчих механізмів. Крім того, при необхідності можливе підключення комунікаційних модулів, наприклад, для зв'язку Profibus DP або CANopen.

Контролер відрізняється високою обчислювальною продуктивністю, вбудованим захистом, наявністю енергонезалежної пам'яті та підтримкою роботи в реальному часі, що особливо важливо для керування динамічними процесами, характерними для насосних станцій.



Рисунок 4.6 – Контролер Modicon M262

У проекті обрано частотний перетворювач Altivar Process ATV630 від Schneider Electric, призначений для керування насосами та роботи з рідинами та газами. Він підтримує керування кількома насосами, має перевантажувальну здатність до 110-150% та забезпечує надійність при нестабільних навантаженнях. Завдяки підтримці Modbus RTU, Modbus TCP та Ethernet, ATV630 легко інтегрується з контролерами та системами автоматизації, що робить його доцільним вибором для поставлених завдань. На рисунку 4.7 зображено перетворювач частоти ATV630.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39



Рисунок 4.7 – Перетворювач частоти ATV630

4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації насосної станції оборотного водопостачання відображає структуру взаємодії компонентів системи та послідовність виконання керуючих впливів. Основною метою автоматизації є забезпечення надійної та стійкої роботи шламового насоса, що перекачує забруднену воду у замкнутому контурі, з можливістю регулювання подачі в залежності від поточних параметрів тиску.

Система автоматизації побудована на двох основних компонентах: шафа автоматизації, що містить програмований логічний контролер (ПЛК), та шафа управління з встановленим частотним перетворювачем (ЧРП). ПЛК отримує сигнали з первинних датчиків, таких як датчики тиску і рівня, обробляє їх згідно з заданим алгоритмом, формує вплив, що управляє, і передає його на частотний перетворювач. Останній регулює частоту обертання електродвигуна, що веде в дію насос, тим самим змінюючи його продуктивність.

Вимірювальна частина включає датчик тиску, встановлений після фільтра, і рівнемір у приймальній ємності. Контроль тиску дозволяє коригувати частоту обертання насоса для підтримки стабільного режиму роботи.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При виході тиску межі допустимого діапазону активується аварійний режим, що супроводжується відключенням насоса. Рівномір забезпечує захист від «сухого ходу» – при недостатньому рівні води насос автоматично блокується, запобігаючи пошкодженню обладнання. (рисунк 4.8). Сигнали з датчиків надходять на аналогові входи контролера. Алгоритм управління реалізований серед Control Expert і передбачає як автоматичний, і ручний режим роботи насоса. При цьому контролер порівнює поточний тиск із уставкою, формує масштабований аналоговий сигнал та передає його на вхід перетворювача. При відключенні насоса або аварії подається команда на скидання частоти. Частотний перетворювач служить сполучною ланкою між ПЛК і електродвигуном, забезпечуючи плавний пуск, захист від перевантажень і адаптацію до умов, що змінюються. Його використання дозволяє скоротити зношування механічних частин і знизити загальне енергоспоживання системи. Крім того, перетворювач здатний передавати в контролер діагностичні дані, такі як струм, напруга та стан приводу.

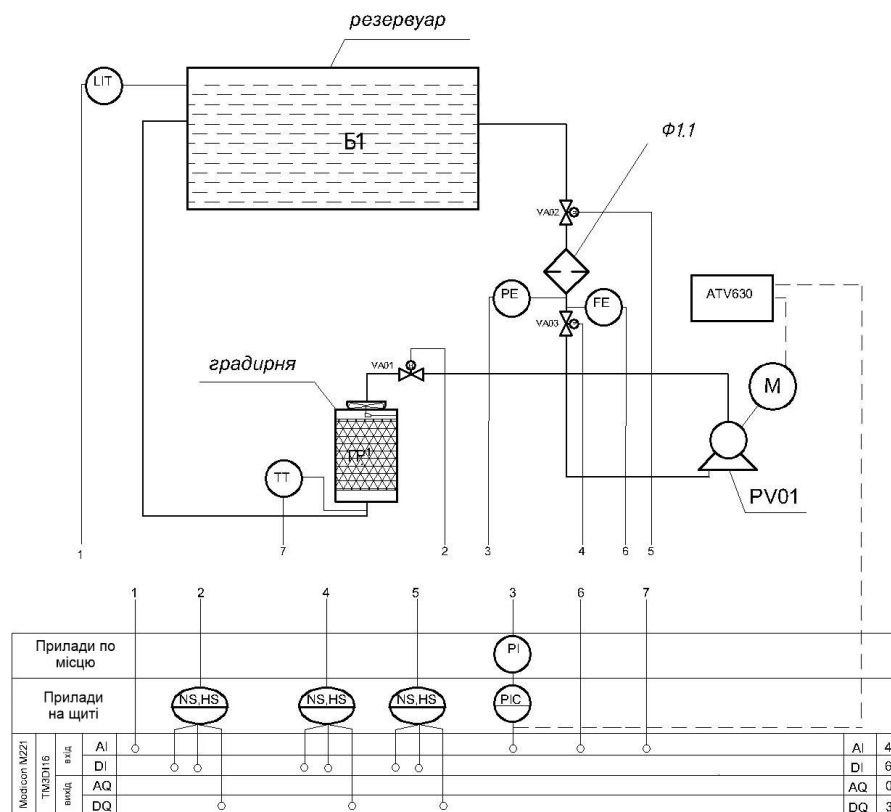


Рисунок 4.8 – Функціональна схема автоматизації

Функціональна схема має гнучкість і допускає розширення у разі потреби. Можливе підключення додаткових датчиків або виконавчих пристроїв, реалізація резервування обладнання та адаптація алгоритму під інші насосні станції. Така архітектура робить систему універсальною та придатною для різних промислових застосувань.

4.3 Проектування шаф автоматизації та управління

Шафа автоматизації призначена для розміщення обладнання, що забезпечує збір, обробку та передачу інформації в системі управління насосною станцією оборотного водопостачання. Шафа є металевою конструкцією габаритами 2000×800×600 мм, встановлену на стандартний цоколь висотою 100 мм. Внутрішнє оснащення шафи виконане на монтажній платі з використанням DIN-рейок та кабельних каналів різних типорозмірів, що забезпечують зручність укладання та обслуговування кабельних трас.

У шафі розміщений програмований логічний контролер Modicon M262, що забезпечує виконання алгоритму керування, що реалізує автоматичне регулювання роботи насоса.

Контролер з'єднаний з модулями дискретного та аналогового введення/виводу, до яких підключаються сигнали від датчиків тиску, рівня, температури та витрати. Вся сигнальна частина підключена через проміжні реле та клеми Phoenix Contact з маркуванням та індивідуальним захистом запобіжниками формату 5×20 мм. Електроживлення пристрою забезпечується від джерела постійного струму ABLS1A24100 з номіналом 24 В та джерела безперебійного живлення ABL8BBU24200 з енергоакумулятором ABL8BPK24A07.

Для захисту схем живлення та сигнальних ланцюгів застосовані автоматичні вимикачі з характеристиками на струми від 2 до 10 А. Внутрішнє освітлення реалізовано за допомогою компактної лампи 11 Вт з живленням 220 В. Для організації підключення зовнішніх пристроїв у шафі встановлені два керовані Ethernet-комутатори Phoenix Contact FL SWITCH 2008, що забезпечують зв'язок між контролером, частотним перетворювачем та віддаленими модулями.

Вся комутація організована на релейній базі з використанням 224 проміжних реле, встановлених на адаптерах зі швидкознімними роз'ємами, що забезпечує надійність та легкість заміни. Кабельна розводка виконана із застосуванням пронумерованих кабельних каналів, спіральної стрічки, гільз для віконця жил та відповідного маркування.

На дверях шафи передбачено встановлення сигнальної арматури, що відображає стан живлення. У середині також розміщена кишеня формату А4 для експлуатаційної документації. Фізичне компонування шафи розроблено у середовищі AutoCAD з дотриманням ергономічних та електробезпечних вимог (рисунок 4.9).

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

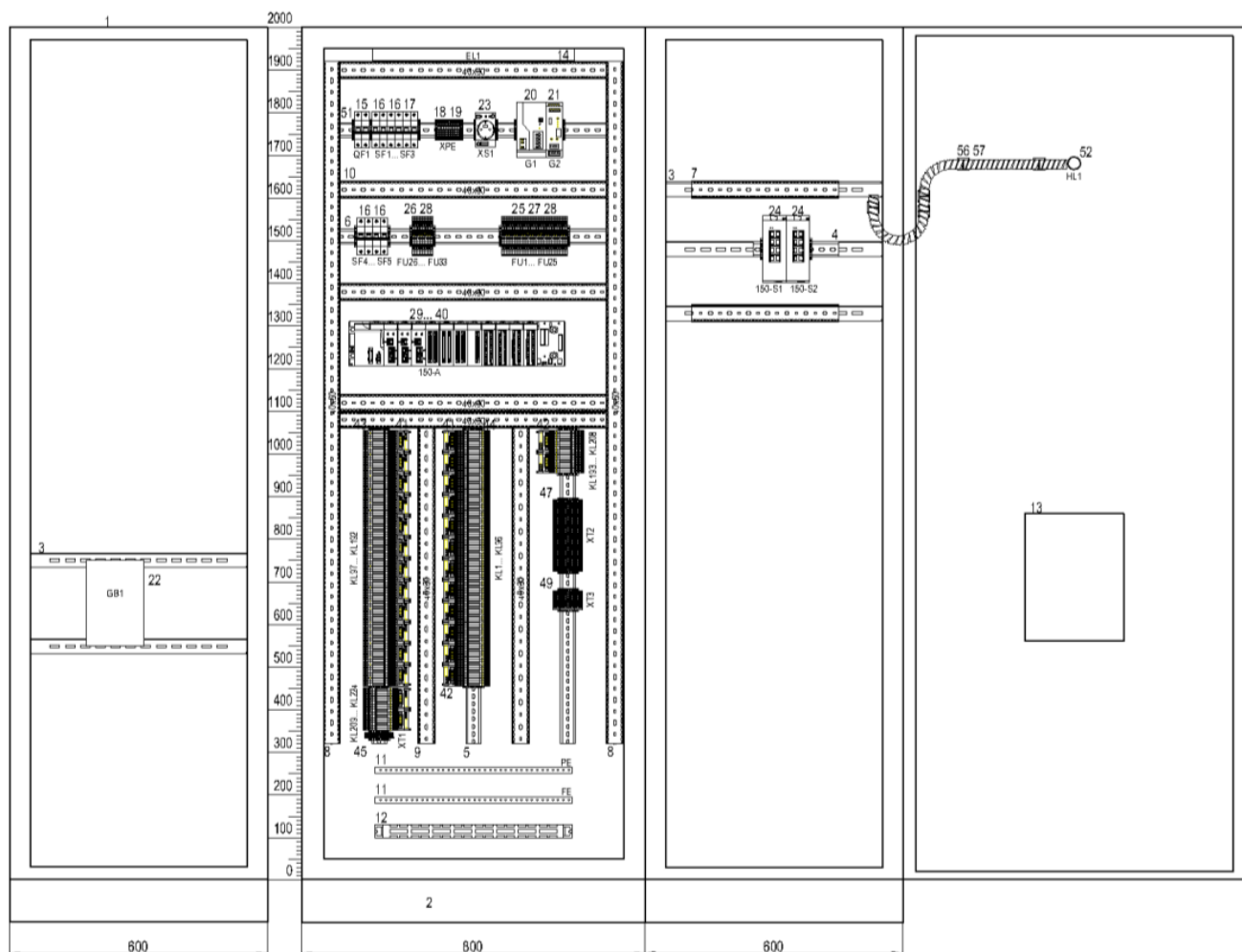


Рисунок 4.9 – Вид на внутрішні площини шафи автоматизації

Також виконано складання шафи у реальному виконанні, що підтверджує відповідність розробленої конструкції робочим умовам та вимогам надійності (рисунок 4.10). Дана шафа використовується спільно з окремою шафою управління частотним перетворювачем, з яким здійснюється обмін даними промислового протоколу.

Шафа управління призначена для розміщення обладнання, що забезпечує регулювання частоти обертання електродвигуна насоса у складі насосної станції оборотного водопостачання. Він виконаний у металевому корпусі розміром 1000×600×300 мм із ступенем захисту IP54, що гарантує надійну експлуатацію в умовах підвищеної запиленості та вологості, характерних для промислових об'єктів.

Внутрішній простір шафи організований з використанням монтажної плати DIN-рейок та кабельних каналів, що забезпечує зручність встановлення та обслуговування обладнання, надійну фіксацію та впорядковане розміщення компонентів.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Також розміщені кнопки управління: "Пуск", "Стоп", "Аварійний зупинка" і трипозиційний перемикач для вибору режиму управління (місцеве/дистанційне/автоматичне).

Керуючі сигнали комутаційно передаються через проміжні реле RXM4GB1BD, що забезпечують гальванічну розв'язку та надійну комутацію вхідних ланцюгів.

Проведення всередині шафи виконано з використанням кабельних каналів розміром 40×40 мм, при цьому формування джгутів здійснюється за допомогою спіральної стрічки, що забезпечує акуратне та компактне укладання провідників. Для герметичного введення зовнішніх кабелів використовуються металеві сальники з різьбленням M20×1.5, що забезпечують надійний захист від проникнення вологи та пилу. Складання шафи виконано у реальному виконанні відповідно до розробленої схеми та вимог стандарту, що підтверджується фотографією зібраної шафи (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Шафа управління у зібраному вигляді

Конструкція успішно пройшла перевірку на відповідність функціональним вимогам, надійність та зручність в експлуатації.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

4.4 Розробка програмного забезпечення для PLC

Для реалізації логіки управління насосної станції застосоване середовище розробки Control Expert, яке дозволяє створювати, налагоджувати та тестувати програми управління на базі ПЛК. Управління здійснюється по одному замкнутому контуру зі зворотним зв'язком, де регульованим параметром є тиск води, а впливом, що управляє, частота обертання насоса, регульована за допомогою частотного перетворювача. Як вихідна інформація використана таблиця змінних (див. рис. 4.12), де визначено основні вхідні та вихідні сигнали системи.

Variables			DDT Types	Function Blocks	DFB Types
Filter			Name = *		
Name	Type	Value			
ALARM_ACTIVE	BOOL				
Cycle_ON	BOOL				
FREQ_CMD	INT				
GE_RESULT	BOOL				
GT_RESULT	BOOL				
INT_PUMP_ON	INT				
LE_RESULT	BOOL				
LT_RESULT	BOOL				
p_max	INT				
p_min	INT				
p_sensor	INT				
P_SETPOINT	INT				
PRESSURE_ALARM	BOOL				
PRESSURE_NORMAL	BOOL				
PUMP_ON	BOOL				
SCALED_SETPOINT	INT				
START	BOOL				
STOP	BOOL				

Рисунок 4.12 – Таблиця змінних проекту управління насосною станцією у середовищі Control Expert

Далі програма реалізована як серії мереж (network), кожна з яких відповідає окремий логічний блок–системи.

Network 1 – реалізація ручного керування насосом. Користувач може вручну запускати та зупиняти насос за допомогою кнопок START та STOP. Результат фіксується змінною Cycle_ON (рис.4.13).

Network 2 – визначення, чи перебуває тиск у межах норми. Якщо P_sensor знаходиться між P_min та P_max, то активується змінна PRESSURE_NORMAL

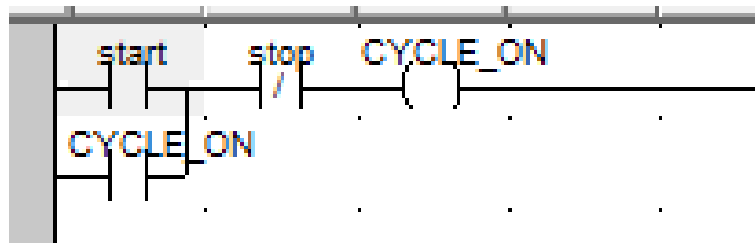


Рисунок 4.13 – Реалізація ручного запуску та зупинки насоса

Network 3 – автоматичне увімкнення насоса. Якщо цикл активний (Cycle_ON = TRUE) та тиск у нормі (PRESSURE_NORMAL = TRUE), активується сигнал PUMP_ON, який включає електродвигун насоса (рис.4.14).

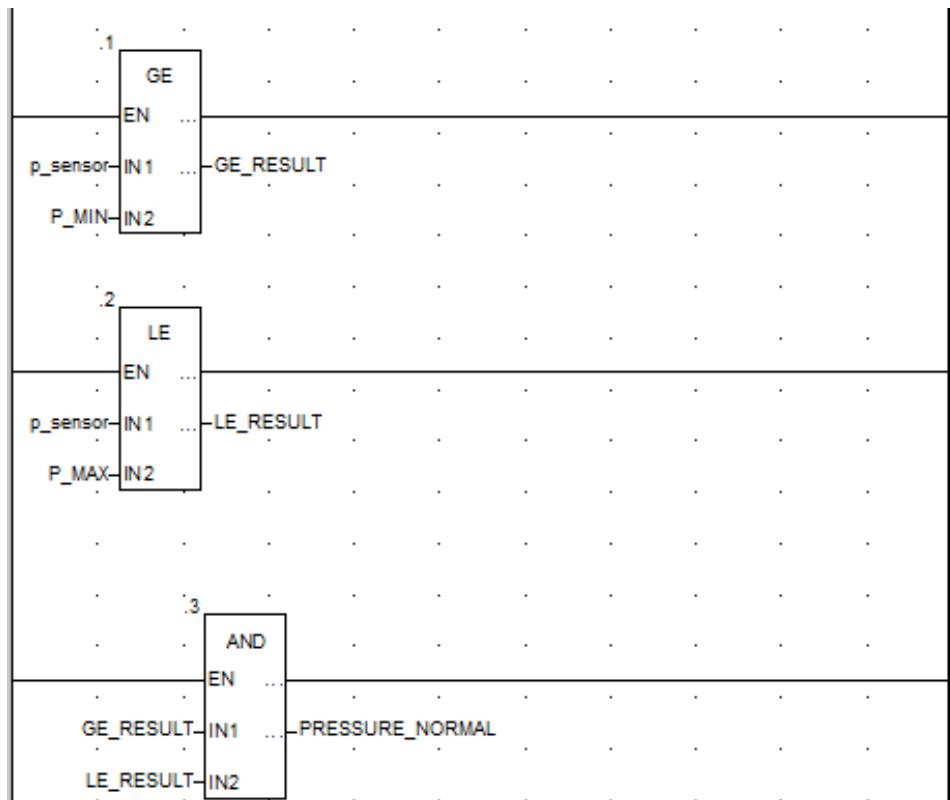


Рисунок 4.14 – Визначення нормального діапазону тиску

Network 4 – виявлення аварійної ситуації. Якщо тиск виходить за межі ($P_{\text{sensor}} < P_{\text{min}}$ або $P_{\text{sensor}} > P_{\text{max}}$), активується ALARM_ACTIVE, сигналізуючи про порушення режиму.

Network 5 – формування команди частотний перетворювач. Якщо насос увімкнений ($PUMP_ON = TRUE$), значення $FREQ_CMD$ розраховується як $P_SETPOINT * 10$ для коректного керування частотою (при цьому враховується масштабування). Якщо вимкнено насос, $FREQ_CMD = 0$ (рис.4.15).

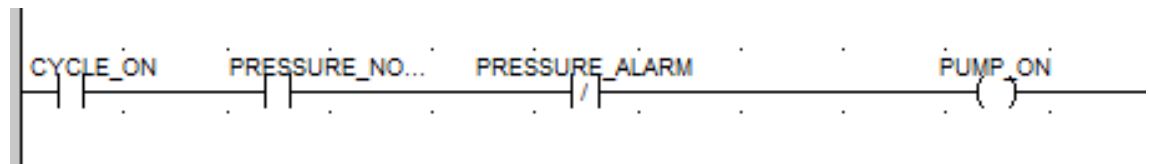


Рисунок 4.15 – Логіка автоматичного увімкнення насоса

Network 6 – скидання аварії. При натисканні кнопки скидання аварії змінна ALARM_ACTIVE обнулюється (рис. 4.16).

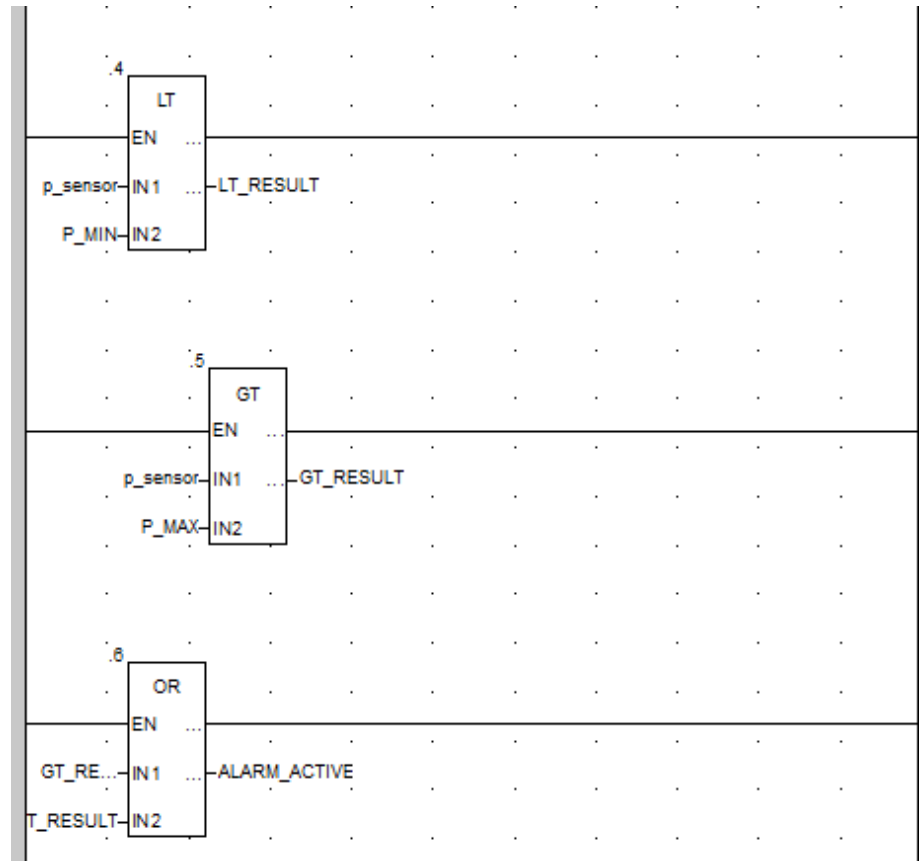


Рисунок 4.16 – Визначення аварійної ситуації

Після написання програми було проведено тестові випробування, які включали кілька сценаріїв. На першому етапі випробувань було перевірено роботу системи у штатному режимі. За допомогою таблиці анімації вручну було встановлено такі значення вхідних змінних: Cycle_ON = TRUE, Alarm_active = FALSE, Pressure_OK = TRUE, Pump_ON = TRUE. Параметр заданого тиску P_Setpoint був встановлений рівним 5, що в блоці множення MUL_INT перетворювалося на значення 50. При активному сигналі Pump_ON через мультиплексор MUX_INT формувалася команда управління частотою FREQ_CMD = 50. На виході логічної схеми встановлювався сигнал Pressure_normal тиску. Таким чином, було підтверджено коректну роботу алгоритму в умовах нормального виробничого циклу.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

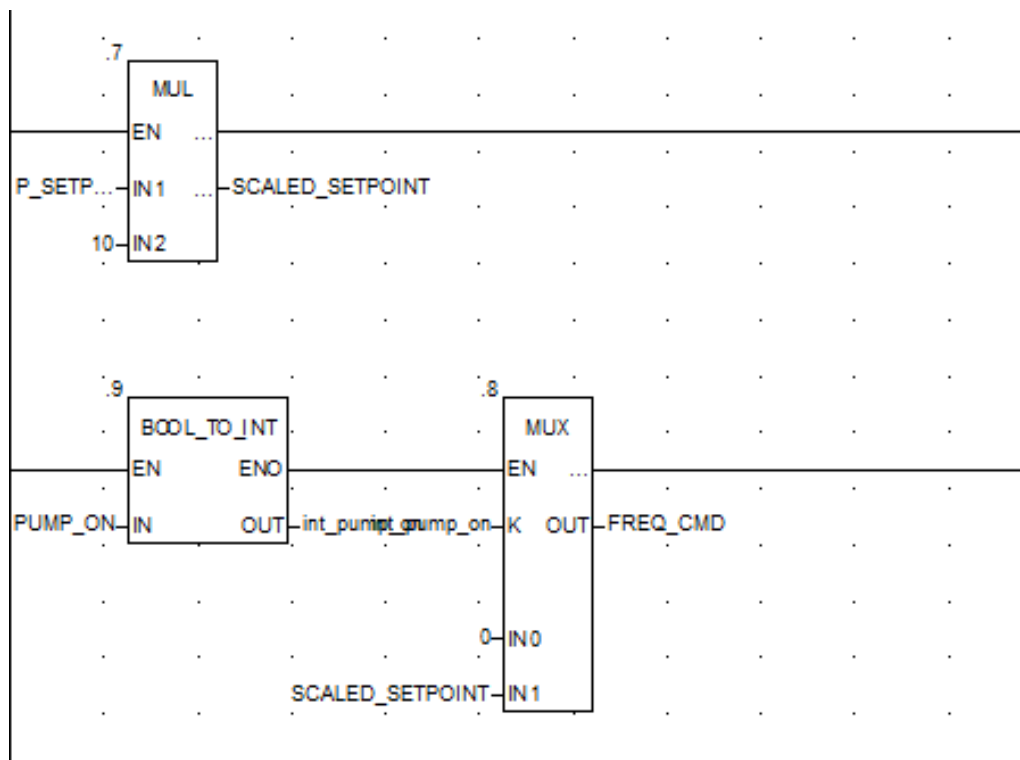


Рисунок 4.17 – Вироблення керуючого сигналу частоти

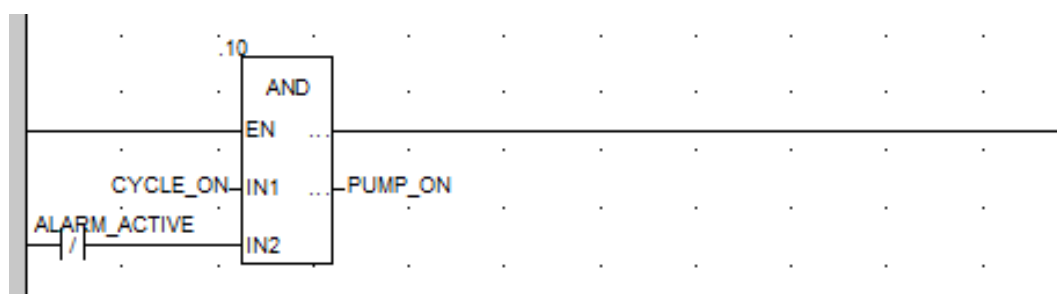


Рисунок 4.18 – Реалізація скидання аварійної ситуації

Імітація аварійної ситуації – зміна значення P_{sensor} за межі допустимого діапазону призводить до активації сигналу $ALARM_ACTIVE$, що ініціює перехід системи в аварійний режим.

Третій сценарій моделює ситуацію, коли фактичне значення тиску перевищує гранично допустиме значення p_{max} . Внаслідок цього відбувається автоматичне відключення насоса ($Pump_ON = FALSE$), скидання керуючої команди ($FREQ_CMD = 0$), деактивація параметра $PRESSURE_NORMAL$, а також включення аварійної сигналізації. Після повернення тиску в допустимий діапазон та усунення аварійного стану, можливе повторне запуск насоса вручну або автоматично (рисунок 4.22).

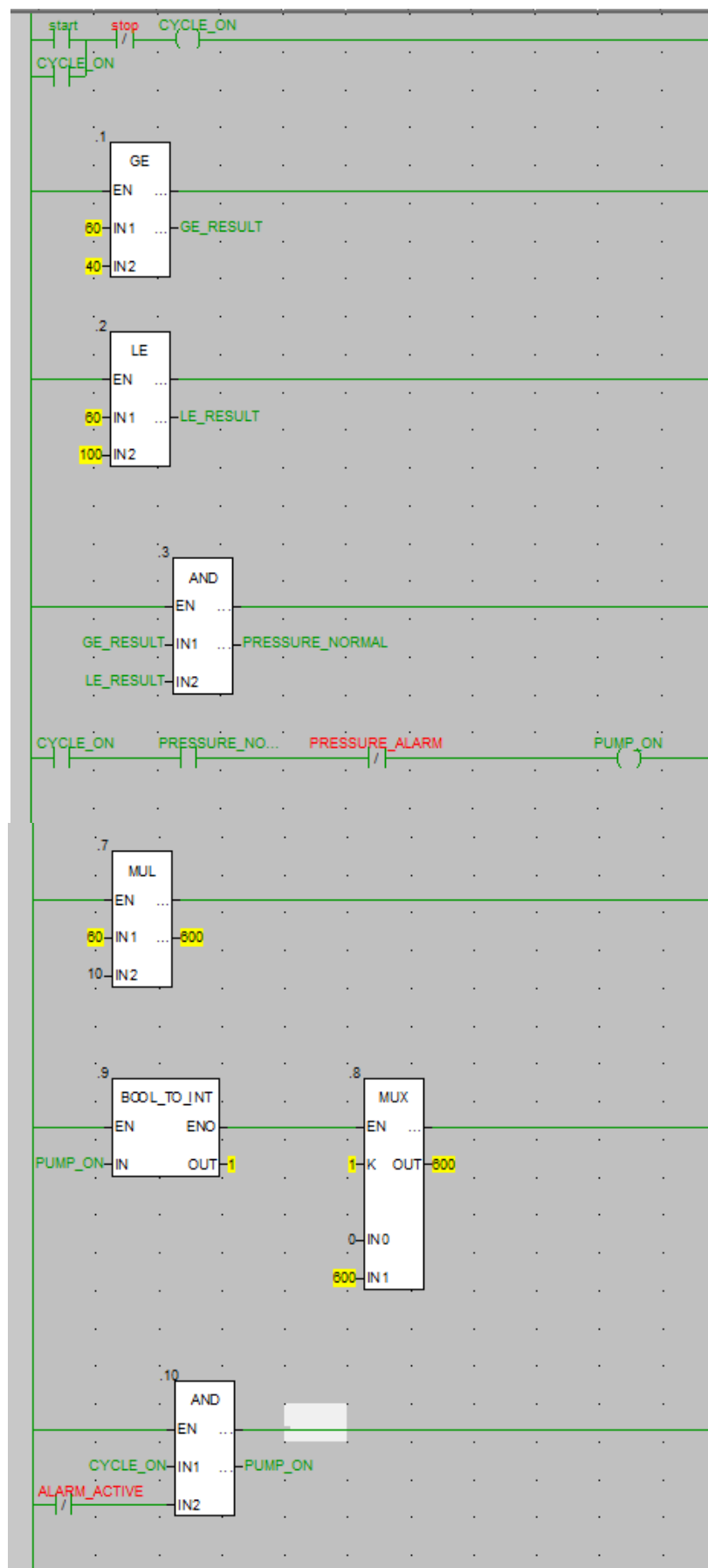


Рисунок 4.19 – Логічна структура керуючої програми (Networks 1–6)

Name	Value	Type	Comment
Cycle_ON	1	BOOL	
p_sensor	60	INT	
p_min	40	INT	
GE_RESULT	1	BOOL	
p_max	100	INT	
LE_RESULT	1	BOOL	
PRESSURE_NORMAL	1	BOOL	
PRESSURE_ALARM	0	BOOL	
PUMP_ON	1	BOOL	
LT_RESULT	0	BOOL	
GT_RESULT	0	BOOL	
ALARM_ACTIVE	0	BOOL	
P_SETPOINT	60	INT	
SCALED_SETPOINT	600	INT	
INT_PUMP_ON	1	INT	
FREQ_CMD	600	INT	
START	1	BOOL	
STOP	0	BOOL	

Рисунок 4.20 – Таблиця символів

Name	Value	Type	Comment
Cycle_ON	1	BOOL	
p_sensor	30	INT	
p_min	40	INT	
GE_RESULT	0	BOOL	
p_max	100	INT	
LE_RESULT	1	BOOL	
PRESSURE_NORMAL	0	BOOL	
PRESSURE_ALARM	0	BOOL	
PUMP_ON	0	BOOL	
LT_RESULT	1	BOOL	
GT_RESULT	0	BOOL	
ALARM_ACTIVE	1	BOOL	
P_SETPOINT	60	INT	
SCALED_SETPOINT	600	INT	
INT_PUMP_ON	0	INT	
FREQ_CMD	0	INT	
START	0	BOOL	
STOP	0	BOOL	

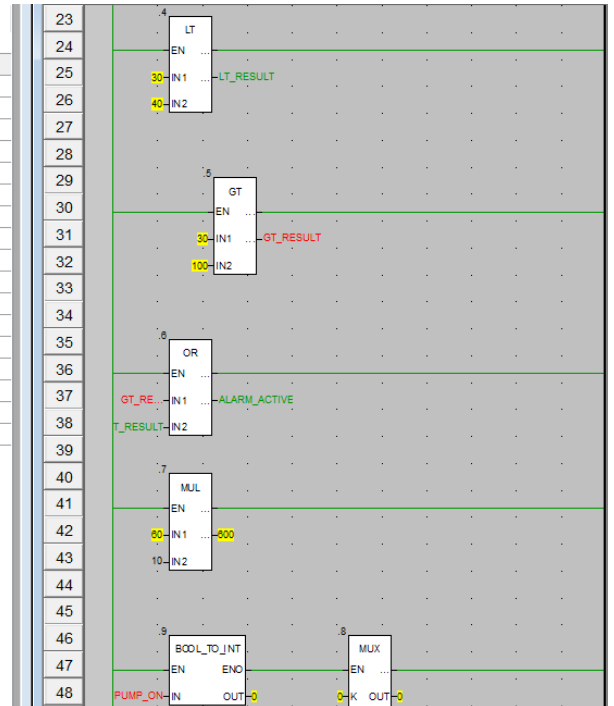


Рисунок 4.21 – Таблиця символів та логіка аварійного відключення

name	Value	Type	Comment
Cycle_ON	0	BOOL	
p_sensor	60	INT	
p_min	40	INT	
GE_RESULT	1	BOOL	
p_max	100	INT	
LE_RESULT	1	BOOL	
PRESSURE_NORMAL	1	BOOL	
PRESSURE_ALARM	0	BOOL	
PUMP_ON	0	BOOL	
LT_RESULT	0	BOOL	
GT_RESULT	0	BOOL	
ALARM_ACTIVE	0	BOOL	
P_SETPOINT	60	INT	
SCALED_SETPOINT	600	INT	
INT_PUMP_ON	0	INT	
FREQ_CMD	0	INT	
START	0	BOOL	
STOP	1	BOOL	

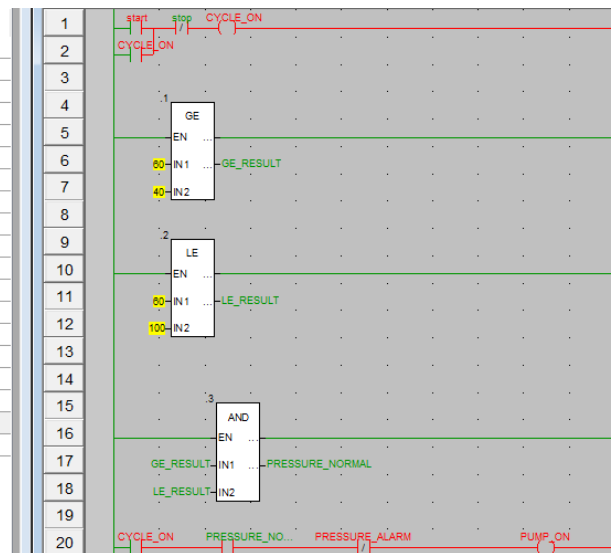


Рисунок 4.22 – Алгоритм реакції на перевищення тиску

Проведене тестування підтвердило працездатність та коректність функціонування розробленого алгоритму керування насосною станцією оборотного водопостачання. У процесі моделювання було перевірено логіку роботи всіх функціональних мереж програми, правильність обробки вхідних сигналів, формування керуючих впливів та реакцію системи на зміну технологічних параметрів.

Результати досліджень показали, що реалізований алгоритм забезпечує надійне керування насосним обладнанням, підтримання заданого режиму роботи та своєчасне реагування на виникнення аварійних ситуацій. Використання середовища Control Expert дозволило виконати повноцінне налагодження програми, перевірити взаємодію між окремими функціональними блоками та оцінити роботу системи в різних режимах експлуатації.

Розроблена програма забезпечує автоматичний контроль тиску в системі, формування команд керування частотним перетворювачем, моніторинг стану насосного обладнання та реалізацію необхідних функцій захисту. Наявність механізмів аварійного відключення та скидання аварій підвищує безпечність експлуатації насосної станції та знижує ризик виникнення аварійних режимів.

Таким чином, створене програмне забезпечення повністю відповідає поставленим вимогам до автоматизованої системи керування насосною станцією оборотного водопостачання та може бути використане для практичної реалізації на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M262.

Висновки до розділу

У четвертому розділі виконано розробку автоматизованої системи керування насосною станцією оборотного водопостачання. Проведено вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації, зокрема датчиків тиску, рівня, температури та витрати, програмованого логічного контролера Modicon M262, частотного перетворювача Altivar Process ATV630 та електродвигуна насосної установки.

Розроблено функціональну схему автоматизації, яка визначає взаємодію між засобами вимірювання, контролером, частотним перетворювачем та виконавчим механізмом. Виконано проєктування шафи автоматизації та шафи керування частотним перетворювачем із підбором необхідного електротехнічного обладнання, засобів захисту, комутації та мережевої взаємодії.

У середовищі Control Expert розроблено програмне забезпечення для програмованого логічного контролера, яке реалізує алгоритми ручного та автоматичного керування насосною станцією, контроль технологічних параметрів, формування керуючих впливів для частотного перетворювача, а також функції аварійного захисту та сигналізації.

Проведено моделювання та тестування роботи програмного забезпечення, за результатами якого підтверджено коректність функціонування розроблених алгоритмів, працездатність системи керування та її відповідність вимогам технологічного процесу насосної станції оборотного водопостачання.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено актуальне завдання розроблення автоматизованої системи керування насосною станцією оборотного водопостачання гірничо-збагачувального комбінату, спрямованої на підвищення енергоефективності, надійності та якості керування технологічним процесом.

У ході виконання роботи проведено аналіз технологічного процесу оборотного водопостачання та визначено особливості функціонування насосної станції як об'єкта автоматизації. Розглянуто технологічну та структурну схеми системи, визначено основні параметри контролю, регулювання та аварійної сигналізації, а також сформовано вимоги до автоматизованої системи керування.

Виконано математичне моделювання та ідентифікацію об'єкта керування. Для основних елементів системи побудовано математичні моделі у вигляді передавальних функцій, отримано передавальні функції розімкнутої та замкнутої систем автоматичного керування.

Проведений аналіз показав, що початкова система є стійкою, однак характеризується значним перерегулюванням, коливальністю та недостатньою якістю перехідного процесу, що обґрунтувало необхідність синтезу регулятора. Виконано синтез одноконтурної системи автоматичного регулювання тиску насосної станції. Для налаштування системи використано методи Зіглера–Ніколса та амплітудного оптимуму (метод Кесслера).

На основі результатів моделювання проведено порівняльний аналіз P-, PI- та PID-регуляторів. Встановлено, що найкращі показники якості забезпечує PID-регулятор, налаштований методом Зіглера–Ніколса. У результаті синтезу системи вдалося покращити основні показники якості регулювання. Час регулювання зменшився з 31,9 с до 20 с, а перерегулювання — з 50 % до 10 %. Також зменшилися коливальність та час наростання перехідного процесу, що свідчить про підвищення якості автоматичного керування та стабільності роботи насосної установки.

У проєктній частині роботи здійснено вибір сучасних технічних засобів автоматизації, зокрема програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M262, частотного перетворювача Altivar Process ATV630, а також датчиків тиску, рівня, температури та витрати. Розроблено функціональну схему автоматизації, спроектовано шафу автоматизації та шафу керування частотним перетворювачем відповідно до вимог промислової експлуатації.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У середовищі Control Expert розроблено програмне забезпечення для програмованого логічного контролера, яке реалізує алгоритми автоматичного та ручного керування насосною станцією, підтримання заданого тиску, формування керуючих сигналів для частотного перетворювача, а також функції аварійного захисту та сигналізації. Проведене тестування підтвердило працездатність і коректність функціонування розробленого алгоритму керування.

Отримані результати свідчать про ефективність запропонованої автоматизованої системи керування та можливість її практичного використання під час модернізації або проєктування насосних станцій оборотного водопостачання промислових підприємств. Реалізація запропонованих технічних рішень дозволить підвищити надійність роботи насосного обладнання, знизити споживання електричної енергії, покращити якість регулювання технологічних параметрів та забезпечити безпечну експлуатацію системи.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Бунь В. П. Теорія автоматичного управління: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 144 с.
2. Боровська Т. М. Теорія автоматичного управління : курс лекцій. Вінниця: ВНТУ, 2018. 256 с.
3. Переверзева А. М. Автоматизація технологічних процесів і виробництв : конспект лекцій. Харків : НТУ «ХП», 2024. 164 с.
4. Бабіченко А. К., Бойко І. В., Капустян О. Є. Технічні засоби автоматизації: навч.-метод. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2024. 183 с.
5. Лукінюк М. В., Лисенко В. П., Лукін В. Є., Гладкий А. М., Шворов С. А. Технічні засоби автоматизації. Ч. 2 : навч. посіб. Ніжин: Видавець Лисенко М. М., 2018. 455 с.
6. Шевченко В. В., Тимчик Г. С. Основи автоматизації технологічних процесів: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 160 с.
7. Леонтьєв П. В., Бурлака В. В., Шевченко О. О. Теорія автоматичного керування : навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2024. 270 с.
8. Іносов С. В., Соболевська Т. Г. Теорія автоматичного керування : методичні вказівки до лабораторних і практичних занять. Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. 16 с.
9. Паянок О. А. Теорія автоматичного керування: методичні вказівки до виконання курсової роботи. Вінниця: ВНТУ, 2023. 68 с.
10. Ковальчук О. В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт. Вінниця: Вінницький національний аграрний університет, 2022. 92 с.
11. Козловська І. В. Автоматизація технологічних процесів : навчально-методичний комплекс дисципліни. Ізмаїл : Ізмаїльський державний гуманітарний університет, 2023. 115 с.
12. Ладанюк А. П., Кишенько В. Д., Луцька Н. М., Власенко Л. О. Сучасна теорія керування технологічними процесами : підручник. Київ: Ліра-К, 2019. 368 с.

					БР.АКП-75.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		