

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр  
за освітньо-професійною програмою  
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності  
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:

***«Система автоматичного керування пунктом розподілу питної води  
дільниці мікрорайону житлових будинків»***

Виконав студент гр. АКІТ-20	_____ Романенко В. І.
Керівник	_____ Савицький О. І.
Нормоконтроль	_____ Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____ Рубан С. А.

# КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 25 » березня 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-20 Романенко Владиславу Ігоровічу

**1. Тема кваліфікаційної роботи:** «Система автоматичного керування пунктом розподілу питної води ділянки мікрорайону житлових будинків»

затверджено наказом по університету № 231с від 25.03.2024 р.

**2. Термін здачі кваліфікаційної роботи:** 03.06.2024 р.

**3. Склад кваліфікаційної роботи:** Пояснювальна записка обсягом 85с., презентація у Microsoft PowerPoint (11 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

**4. Консультанти кваліфікаційної роботи:**

Розділ 1-2

доц. Савицький О. І.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

## 5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.24</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.24</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.24</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.24</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.24</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.24</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>03.06.24</i>

6. Дата видачі завдання: 29.01.2024р.

Керівник \_\_\_\_\_ /Савицький О.І./

7. Запевнення: Я, Романенко Владислав Ігорович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент \_\_\_\_\_ / Романенко В. І./

## АНОТАЦІЯ

Романенко В. І. «Система автоматичного керування пунктом розподілу питної води дільниці мікрорайону житлових будинків».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти – бакалавр, за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

Робота складається зі вступу, двох розділів, висновків, списку літератури з 30 позиції. Загальний обсяг роботи становить 84 сторінки, з яких основний зміст роботи викладено на 75 сторінках, робота включає 6 таблиць і 50 рисунків.

Об'єкт дослідження: технологічний процес підкачування води, як об'єкт автоматичного контролю і управління.

Предмет дослідження: методи автоматичного контролю і регулювання процесу підкачки води.

Метою роботи є розробка методів підвищення ефективності автоматичного контролю та регулювання технологічного комплексу підкачки води.

У роботі розглянуто опис технологічного процесу і виконано аналіз методів керування та існуючих систем автоматичного керування. Розроблено функціональну та структурну схеми системи автоматичного керування стабілізації тиску в магістралі, виконано дослідження динамічних режимів роботи САК за допомогою середовища MATLAB, де були побудовані часові та частотні характеристики, визначено прямі показники якості САК.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, НАСОСНА СТАНЦІЯ, ПІД – РЕГУЛЯТОР, ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС, РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ, СТАНЦІЯ ПІДКАЧКИ ВОДИ, MATLAB, SIMULINK

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>АНОТАЦІЯ</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Романенко В.І.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О.І.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Тронь В.В.</i>					
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						3	1
					<i>КНУ АКІТ-20</i>		

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	8
1.1 Системи місцевого водопостачання.....	8
1.2 Опис технологічного процесу та об'єкта автоматизації.....	9
1.3 Аналіз методів керування та існуючих САК.....	12
1.4 Аналіз існуючих рішень.....	16
1.4.1 Проект комплексної автоматизації насосних станцій від компанії АКУТЕК.....	16
1.4.2 Регулювання тиску в системі водозабезпечення за допомогою головного та допоміжних насосів.....	20
1.5 Предмет проектування та опис існуючих проблем водопостачання...	21
1.6 Постановка завдання.....	24
Висновки до розділу.....	26
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ.....	27
2.1 Розробка функціональної та структурної схеми САР стабілізації тиску в трубопроводі.....	27
2.1.1 Аналіз об'єкта управління.....	28
2.1.2 Математична модель асинхронного короткозамкнутого електродвигуна.....	32
2.1.3 Динамічна модель перетворювача частоти.....	35
2.2 Математичне забезпечення.....	43

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ЗМІСТ</i>		
Розроб.		Романенко В.І.					
Перевір.		Савицький О.І.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затверд.		Тронець В.В.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						4	2
					<i>КНУ АКИТ-20</i>		

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	8
1.1 Системи місцевого водопостачання.....	8
1.2 Опис технологічного процесу та об'єкта автоматизації.....	9
1.3 Аналіз методів керування та існуючих САК.....	12
1.4 Аналіз існуючих рішень.....	16
1.4.1 Проект комплексної автоматизації насосних станцій від компанії АКУТЕК.....	16
1.4.2 Регулювання тиску в системі водозабезпечення за допомогою головного та допоміжних насосів.....	20
1.5 Предмет проектування та опис існуючих проблем водопостачання.....	21
1.6 Постановка завдання.....	24
Висновки до розділу.....	26
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ.....	27
2.1 Розробка функціональної та структурної схеми САР стабілізації тиску в трубопроводі.....	27
2.1.1 Аналіз об'єкта управління.....	28
2.1.2 Математична модель асинхронного короткозамкнутого електродвигуна.....	32
2.1.3 Динамічна модель перетворювача частоти.....	35
2.2 Математичне забезпечення.....	43

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Романенко В.І.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О.І.</i>				4	2
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>ЗМІСТ</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Тронь В.В.</i>			<i>КНУ АКІТ-20</i>		

2.2.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення електродвигуна.....	43
2.2.2 Розрахунок параметрів перетворювача частоти.....	45
2.2.3 Розрахунок номінальних параметрів насосної установки.....	45
2.3 Синтез контуру регулювання тиску.....	48
2.4 Дослідження динаміки САК насосної установки.....	52
2.5 Дослідження динамічних режимів роботи САК.....	58
2.6 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	63
2.7 Вибір технічного забезпечення і опис його характеристик.....	67
Висновки до розділу.....	79
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	8

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

## ВСТУП

Системи водопостачання та водовідведення, що були збудовані в основному в період 70-80-х роках 20 століття, характеризуються значними втратами води, високим енергоспоживанням та значним зносом якості інфраструктури. Ці проблеми актуальні для переважної більшості підприємств України пов'язаних з водопостачанням та водовідведенням, оскільки призводять не лише до неефективного використання ресурсів, таких як питна вода та електроенергія, але й до нераціонального витрачання фінансових ресурсів. Завданням цього проекту є вирішення питань, пов'язаних з розробкою АСУ пунктом розподілу питної води дільниці мікрорайону житлових будинків та насосної станції системи водопостачання, яка покращить якість обслуговування споживачів водних ресурсів, зменшить енергетичні витрати та збільшить термін служби інфраструктури водного комунального господарства. Існує низка факторів, що визначають особливості роботи водорозподільних споруд:

- Робота водопровідних споруд в умовах постійно змінюваних навантажень по споживанню та напору;
- Залежність режиму роботи від якості початковою природної води;
- Така географічна розташованість об'єктів, особливо коли існує кілька станцій, які обслуговують систему, вимагає координації їхньої діяльності з одного центрального пункту;
- Необхідності постійного підвищення продуктивності водопостачання внаслідок зростання міст і пов'язаного з цим збільшення водоспоживання;
- Необхідності забезпечення економічної роботи насосних агрегатів - великими споживачами електроенергії.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Романенко В.І.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О.І.</i>				6	2
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-20</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Тронь В.В.</i>					



Це вимагає застосування централізованого керування функціонуванням водорозподільних споруд.

В середньому близько 60% витрат електроенергії підприємства припадає на долю електродвигунів, які використовуються в насосних станціях.

Швидкий ріст цін на енергоносії та ресурси призвів до того, що загальна сума затрат на них стала надзвичайно високою. В результаті є гострою необхідність максимального енергозбереження. Аналіз витрат електроенергії показав, що вирішити таке завдання можна двома способами – організаційно-технічні заходи направлені на виключення витрат енергоресурсів без необхідності, та впровадження енергоефективних технологій та енергозберігаючого обладнання, що дає можливість виконувати той самий об'єм роботи при менших затратах ресурсів.

Електропривід – енергосилова основа сучасного виробництва, оскільки завдяки своїй простоті та відносно не високій вартості, знайшов широке застосування в різноманітних механізмах. Найчастіше використовуються електроприводи з асинхронними короткозамкнутими двигунами. Характерним прикладом використання асинхронного двигуна є насосні станції холодного та гарячого водопостачання, каналізаційні насосні станції та системи опалення. Нажаль в деяких випадках використовуються не регульовані електроприводи, що не дає можливості забезпечити режим раціонального енерговикористання. Обрані, виходячи із максимально необхідної продуктивності, механізми більшу частину часу працюють з меншою продуктивністю, оскільки необхідність ресурсу змінюється в різні періоди часу.

У контексті сфери комунальних водопостачань слід вказати, що фактичне споживання електроенергії значно нижче за необхідний рівень. В результаті впровадження автоматичної системи управління технологічним процесом змінюється форма та характер праці, підвищується рівень безпеки, кваліфікації та рівень знань робітників, покращується енергоефективність використання ресурсів при не змінній продуктивності.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		7

РОЗДІЛ 1  
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ  
АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.2 Системи місцевого водопостачання

В місцевих забудовах існує дві групи можливих схем водопостачання:

- водопостачання при підключенні до централізованих водосистем;
- децентралізована (місцева) система водопостачання.

Перша включає в себе очисні споруди та потужні насосні станції, які можуть розподіляти та постачати воду належної якості з відповідним тиском по більшій частині системи трубопроводу водоканалу міста.

В той час як друга - є децентралізованою та включає в себе маленькі дільниці водо розподілу, водопідйомні установки, накопичувальні баки та окремих фільтраційний вузол.

Так як у більшості випадків місцеві водоканали є централізованими та надають питну воду необхідної якості, тому можливі існуючі системи з встановленими елементами очищення та перевірки якості води безпосередньо на пункті розподілу розглядатися не будуть.

У процесі проектування внутрішніх систем водопостачання в житлових будинках використовують різноманітні типи схем. Це обумовлено варіаціями у місцевих будівельних умовах. Важливим є розподіл цих систем за класифікацією, залежно від елементів обладнання, які застосовуються. Відповідно, у житлових будівлях застосовують такі види схем водопостачання:

- проста, без використання насосних установок;
- з використанням насосних установок;
- з використанням напірних баків;

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Романенко В.І.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О.І.</i>				8	15
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-20</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Тронь В.В.</i>					
<i>РОЗДІЛ 1</i>							

- з комбінацією насосних установок і напірних баків;
- з гідропневматичними резервуарами;
- з запасними резервуарами.

## 1.2 Опис технологічного процесу та об'єкта автоматизації

Насосна станція - це складний комплекс насосних установок, споруд і пристроїв, що забезпечують в сукупності безперебійну подачу питної води споживачеві через розводящу мережу системи водопостачання, тому в експлуатаційному відношенні насосна станція є основним виробничим цехом.

Насосна станція складається з машинного залу, розподільного пристрою 0,4 кВ та побутових приміщень. У машзалі розташовано три насосних агрегати (Рис.1.1) з електродвигунами з короткозамкненим ротором.

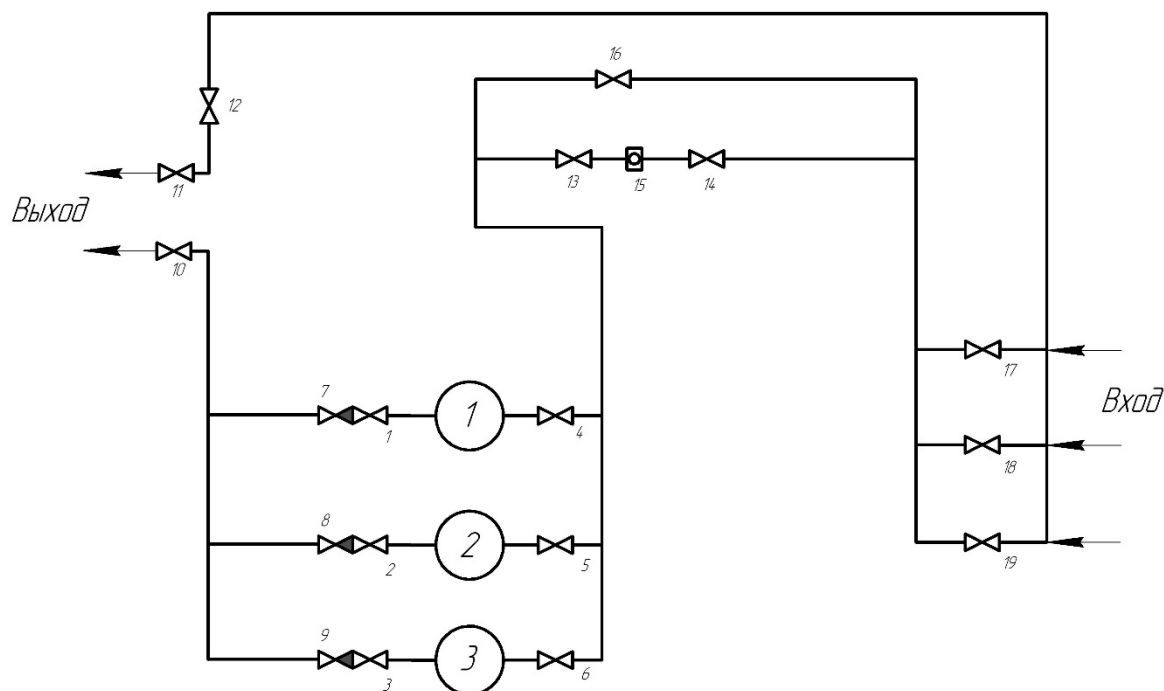


Рисунок 1.1 – Функціональна схема насосної станції

Технологічний процес полягає в тому, що вода надходить з магістралі водопостачання на входні засуви №17, 18, 19, потім по трубопроводу надходить на засуву №14, йде через витратомір №15, засуву №13 і надходить на

					КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

всмоктувальні засуви №4,5,6. При ремонті засувів №14,13 вода проходить через засув №16 і надходить на засуви №4,5,6 і насоси №1,2,3. У роботі завжди знаходиться один насос, другий - у резерві, третій - у ремонті. З виходу насосів вода надходить на напірні засуви №1,2,3 і зворотний клапан №7(8,9) і надходить в магістраль через засув №12, №11.

Відцентровий насос пускають в роботу тільки після заповнення всмоктувального трубопроводу і самого насоса водою. Для затоки насоса водою відкривають всмоктувальний засув №4(5,6), потім напірний засув №1(2,3) і вирівнюють тиск в магістралі. Закривають засув №1(2,3), запускають насосний агрегат №1(2,3) і засувом №1(2,3) виводять насосний агрегат №1(2,3) на потрібний тиск, спостерігаючи за показаннями манометра №20, яке повинно бути  $(0,4 \times 8) + 1 = 4,2$  атм.

Основним елементом НС, звичайно, насосна установка яка може містити один або декілька насосів. В наш час найбільш широко використовуються відцентрові насоси (Рис.1.2).

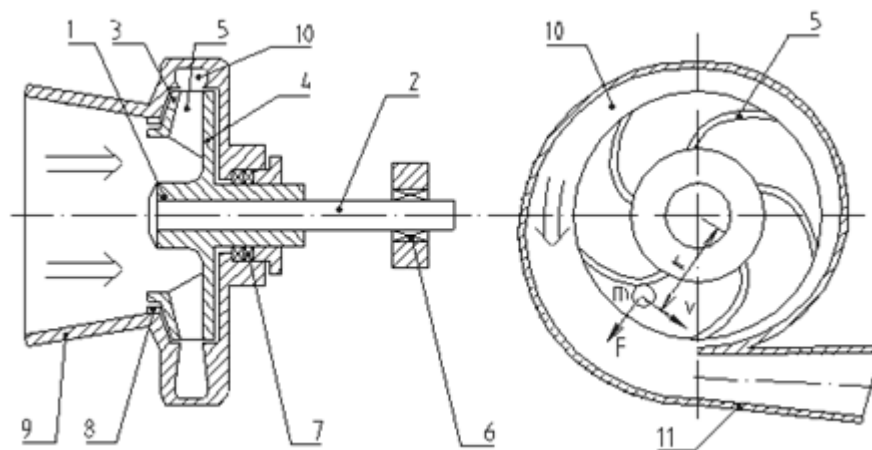


Рисунок 1.2 – Принципова схема відцентрового насосу

На рисунку 1.2 показані:

- Обратний клапан із фільтруючою сіткою, встановлений в корпусі та на всмоктувальній трубі водяного насоса перед його запуском, призначений для утримання частинок;
- Фільтруюча сітка, яка утримує великі частинки, що плавають у воді;

									Арк.
									10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ				

- Засувка, розміщена на всмоктувальному патрубку поряд з насосом;
- Вакуумметр, розташований на трубопроводі між клапаном та корпусом насоса для вимірювання рівня вакууму на стороні всмоктування;
- Кран для вивільнення повітря, встановлений у верхній частині корпусу для полегшення наповнення системи;
- Зворотний клапан, розташований на напірному трубопроводі, що блокує зворотний рух води через насос під час роботи іншого насосу в системі;
- Засувка на напірному трубопроводі, яка використовується для запуску, зупинки та регулювання продуктивності і тиску насоса;
- Манометр, встановлений на напірному патрубку, для вимірювання тиску, що створюється насосом;
- Запобіжний клапан (не показаний на схемі), встановлений на напірній трубі після клапану, щоб захистити насос, трубопровід і саму трубу від гідравлічних ударів;
- Пристрій для відсічення насоса, використовуваний для контролю роботи насоса.

Спрощена електрична схема силових ланцюгів показана на рис. 1.3,а. Штриховий лінією із зірочкою позначена взаємна механічне блокування контактних апаратів, що забороняє одночасне підключення електродвигуна до мережі і до перетворювача частоти. Взаємодія блоків станції і гідравлічної системи показано на рис.1.3,б.

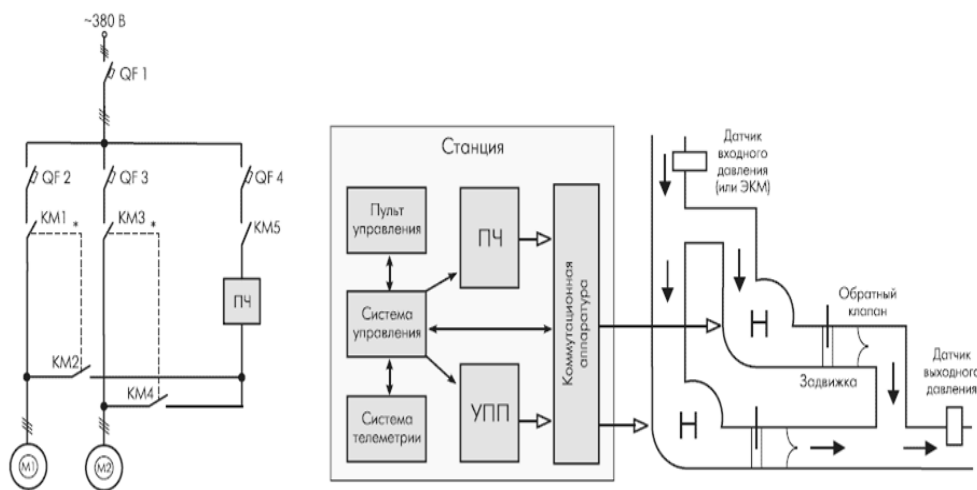


Рисунок 1.3 – Спрощена схема ланцюгів

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ				

Електричне живлення насосної станції (НС) забезпечується від трансформаторної підстанції (ТП). Електрична енергія подається на розподільний пристрій (РУ), до якого під'єднане силове електричне обладнання, а також розташовані первинні апарати для вимірювання споживання електроенергії. В машинному залі НС розташовані як основне, так і допоміжне обладнання станції. Основне обладнання включає насоси ЦН1-ЦН3 та електроприводи М1-М3. До допоміжного обладнання входять дренажні, пожежні насоси, вакуумні насоси, засувки, вентилятори, обігрівачі та інші елементи. Силове електрообладнання встановлене у щитовій насосної станції, яка включає силові шафи управління (СШУ), перетворювачі частоти (ПЧ) та при необхідності, компенсатори реактивної потужності (КРМ).

### 1.3 Аналіз методів керування та існуючих САК

Застосування РЕП в системах автоматичного управління насосних установок дозволяє привести у відповідність режим їх роботи з водоспоживанням або припливом стічних вод. Завдяки цьому стабілізується тиск у водопровідній мережі і рівень води в приймальних ємностях каналізаційних насосних станцій або резервуарах систем водопостачання, економиться енергія, скорочуються виттки та непродуктивні витрати води, з'являється можливість збільшити одиничну потужність насосних агрегатів та зменшити їх число.

РЕП використовують зазвичай в насосних установках, оснащених агрегатами досить великої потужності (75 ... 100 кВт і вище), що характеризуються нерівномірністю подачі і великою динамічністю висоти підйому води.

У САУ водопровідних насосних станцій, що працюють в безбаштову водопровідну мережу, регульованим параметром зазвичай є тиск в певній точці (точках) водопровідної мережі. У тих випадках, коли насосна станція

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	Арк.
						12
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

розташована поблизу споживачів або коли падіння тиску в трубопроводах між точкою зняття інформації і колектором насосної станції мало залежить від витрати води, в якості параметра регулювання приймають тиск на напірному колекторі станції.

Насосна станція може бути оснащена агрегатами з регульованим та не регульованим електроприводом одночасно або тільки з РЕП.

При одночасній роботі регульованих і нерегульованих насосних агрегатів САУ забезпечує їх взаємодію: змінює кутову швидкість обертання регульованих агрегатів, включає або відключає в потрібний момент нерегульовані агрегати, обмежує з енергетичних і технологічних показників допустимий діапазон зміни кутової швидкості обертання регульованих агрегатів. При роботі декількох насосних установок, що подають воду у водопровідну мережу труб цілого району, САУ підтримує оптимальне середньозважене значення ККД групи насосних станцій.

Системи автоматизації можуть бути як локальними, так і входити до складу АСУ технологічними процесами подачі та розподілу води. У цих системах електронно-обчислювальні машини, за допомогою яких виконують аналіз інформації, що збирається від насосних станцій, водоводів, резервуарів і розподільних мереж та виконують розрахунки по оптимізації режимів роботи системи подачі та розподілу води.

Інформація про технологічні та електричні параметри (тиск, витрата і рівень води, електричний струм, напруга) в пристроях перетворюється в малопотужні уніфіковані електричні аналогові й релейні сигнали. Регулюють режим роботи насосних установок зазвичай по пропорційно-інтегральному закону (ПІ-закону). Для реалізації команд, що надходять із системи автоматизації, агрегати та інше обладнання оснащують додатковими механізмами. В насосних установках набули поширення мікропроцесорні пристрої і промислові комп'ютери, які дозволяють легко і швидко перенастроювати закони регулювання при зміні динамічних характеристик керованого об'єкта.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		13

Наявність РЕП знижує аварійність в системах водоподачі та водовідведення завдяки зменшенню кількості включень і відключень насосного агрегату і більш плавного характеру змін подачі води в системі.

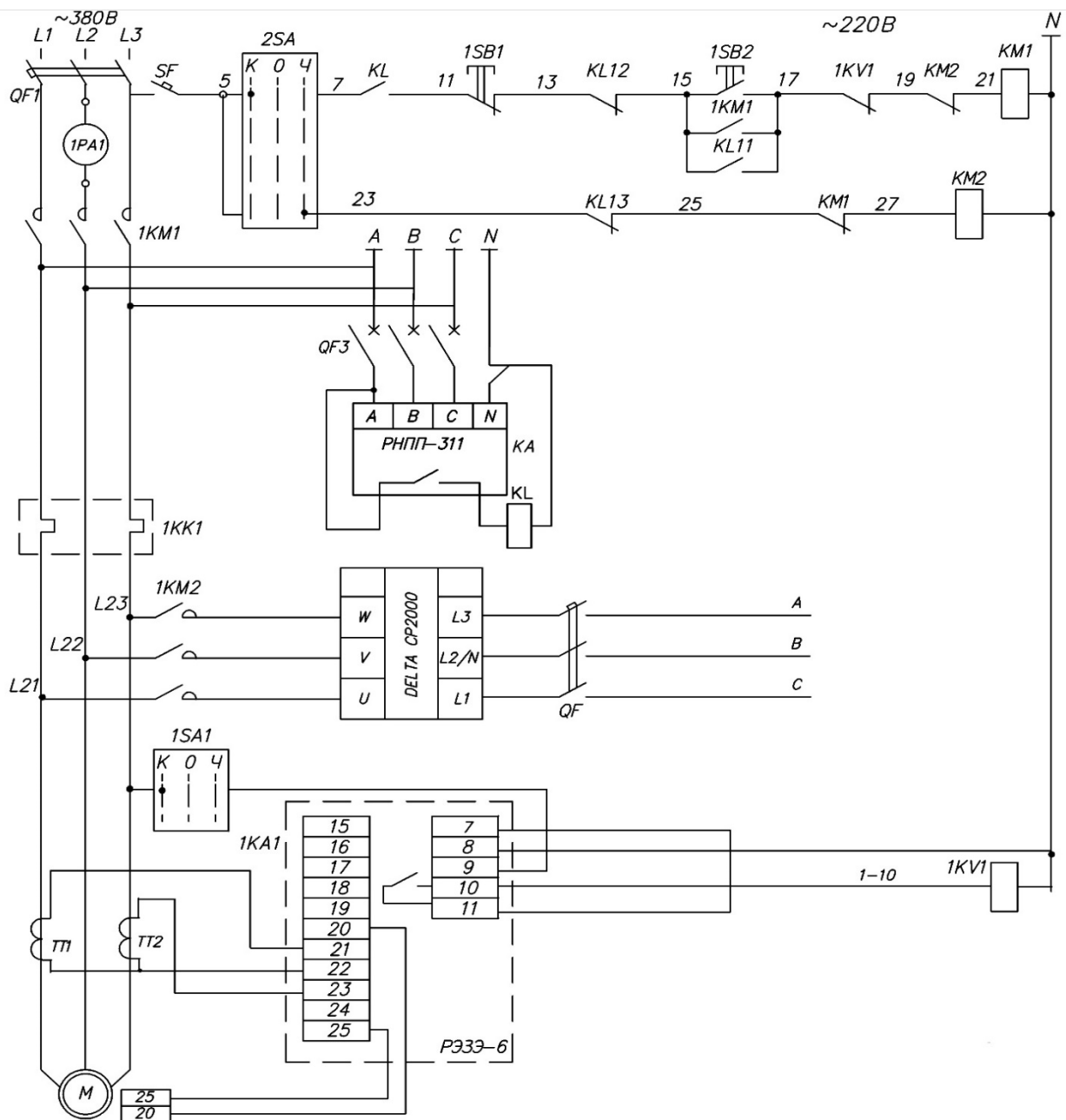


Рисунок 1.4 – Принципова електрична схема автоматизації

Застосування РЕП в насосних установках сприятливо і з екологічної точки зору, так як сприяє зменшенню надходження стічних вод у систему водовідведення за рахунок скорочення витоків і непродуктивних витрат води. При правильно обраних об'єктах впровадження, застосування РЕП



окупається в насосних установках систем водоподачі за 1 ... 2 роки, а в системах водовідведення - за 3 ... 4 роки.

Також, безпосередній характер роботи насосної станції визначається потребами споживача, тобто необхідно забезпечити цілодобове якісне обслуговування. Це включає в себе безперебійне водопостачання незалежно від часу доби і підтримання нормального тиску в магістралі трубопроводу.

Крім того, може застосовуватися метод каскадно-частотного регулювання, при якому перетворювач частоти (ПЧ) керує одним насосом, в той час як інші насоси запускаються або зупиняються відповідно до потреби. При необхідності включення додаткових насосів їх електродвигуни з'єднуються напряму з електричною мережею. Такий підхід має переваги у вигляді простоти та надійності, а також зменшує необхідність у великій кількості обладнання для автоматизації насосної станції.

Однак, даний спосіб має досить серйозні недоліки:

- поява гідроударів при пуску/зупинення додаткових насосів;
- поява кидків напруги в електромережі, які пов'язані з перехідним процесом пуску двигунів;
- неможливість підтримки точного тиску в системі, перепади тиску при включенні або виключенні додаткових насосів.

Звичайно, вплив описаних недоліків можна знизити. Щоб уникнути гідроударів і кидків напруги, можна застосовувати пристрої плавного пуску, однак це економічно доцільно лише при відносно великих потужностях двигунів. Якість регулювання тиску також можна поліпшити за рахунок ускладнення алгоритму управління, що реалізується обчислювачем даної системи. Проте всі ці заходи пов'язані з додатковими фінансовими витратами, що нівелює привабливість ідеї.

Цих недоліків позбавлений спосіб управління, коли при неможливості забезпечити необхідну в даний момент продуктивність НС одним насосом, до роботи під'єднується наступний насос, а перший насосний двигун

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15

перемикається на мережу живлення, а той, що доєднався до роботи – виводиться на робочу частоту під керуванням ПЧ, за заданою кривою розгону.

#### 1.4 Аналіз існуючих рішень

##### 1.4.1 проект комплексної автоматизації насосних станцій від компанії АКУТЕК

Перетворювач частоти контролює заданий тиск за допомогою головного насоса (помпи-майстра), в той час як інші насоси в системі працюють від мережі (прямий пуск) або через пристрої для плавного пуску. Таке каскадно-частотне керування дозволяє замінити один дорогий високопотужний насос на два або три менш потужних насоса.

Переваги такого рішення включають:

- Повна автоматизація роботи станції.
- Збільшений термін служби насосного обладнання.
- Відсутність потреби в частотних перетворювачах для ведених двигунів.
- Постійне підтримання тиску в системі водопостачання на заданому рівні.
- Висока надійність станційного обладнання.
- Значна економія електроенергії.
- Можливість управління декількома станціями з єдиного диспетчерського центру.
- Ефективне дистанційне керування через хмарний сервіс, включаючи мобільні пристрої.

Це управлінське рішення дозволяє використовувати один перетворювач частоти (ПЧВ) для трьох насосів, усуваючи необхідність придбання додаткових частотних перетворювачів для ведених двигунів. Енергоефективність такого підходу забезпечується автоматичним включенням потрібної кількості насосів в залежності від актуальної потреби у воді, що оптимізує споживання енергії.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		16

На ілюстраціях 1.5-1.6 представлено каскадний контролер моделі СУНА-122, який управляє насосною станцією відповідно до даних з датчика тиску ПД100И, розміщеного на виході станції. Контролер забезпечує вибір між режимами роботи: Ручний, Автоматичний або Віддалений, що дозволяє гнучко адаптувати роботу станції до поточних умов експлуатації.

У режимі РУЧНОГО управління, запуск насосів відбувається за допомогою кнопочного поста, який знаходиться на шафі керування підвищувальної насосної станції. Оператор має безпосередній контроль та може вручну вмикати або вимикати насоси відповідно до потреби.

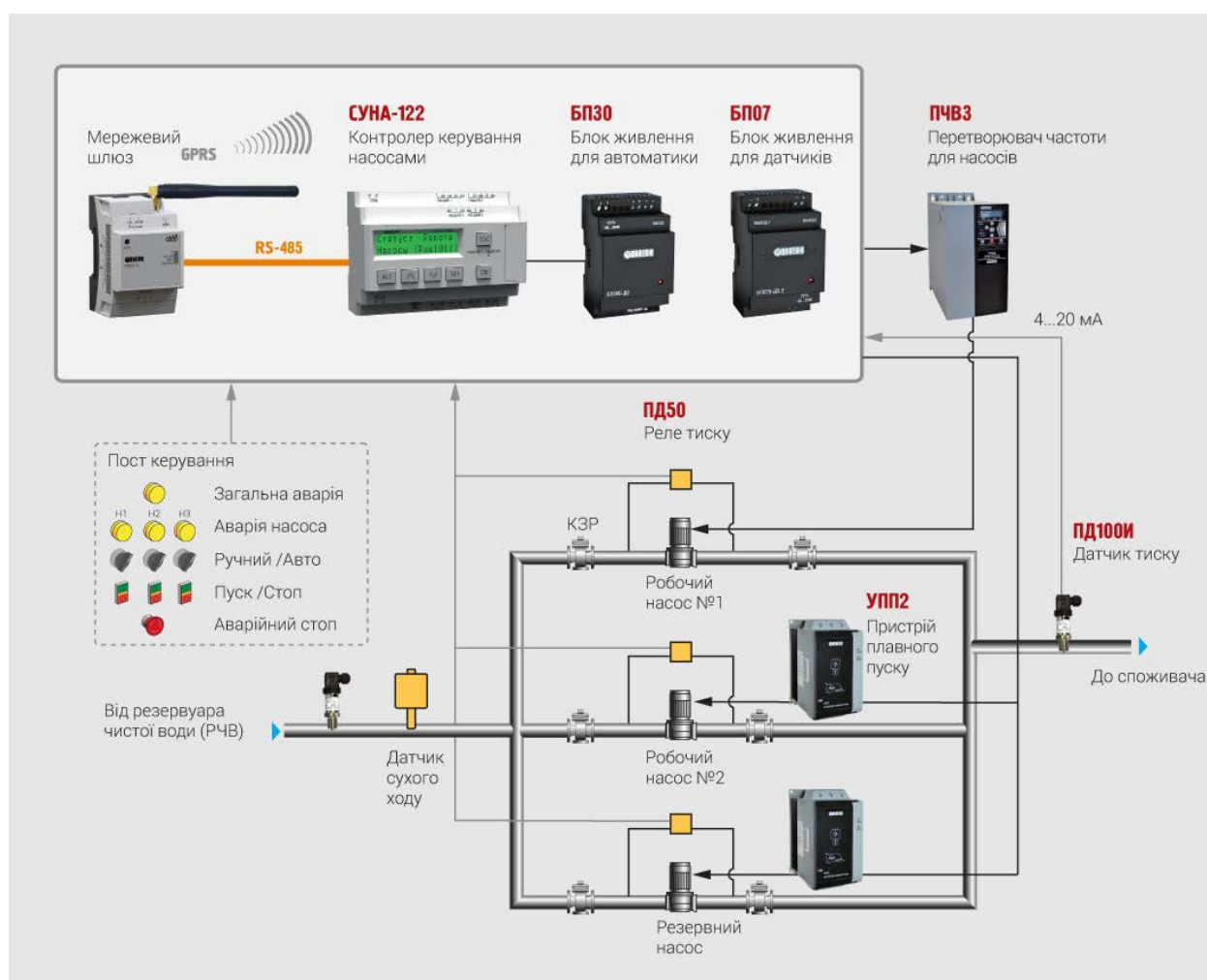


Рисунок 1.5 – Схема автоматизації

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

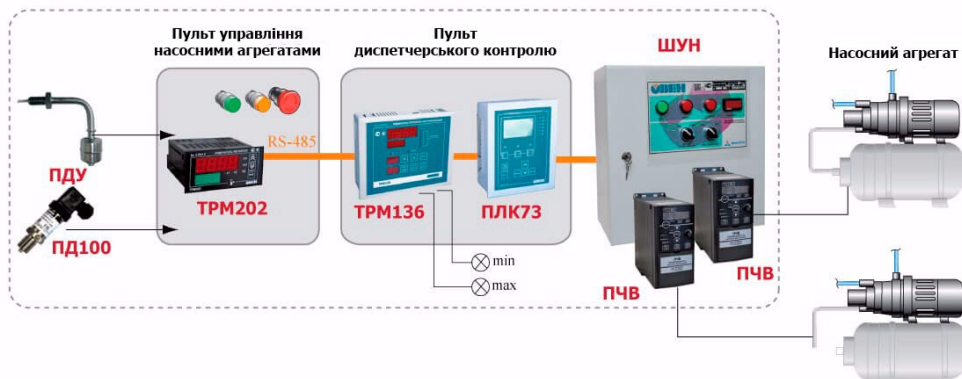


Рисунок 1.6 – Функціональна схема керування

У режимі АВТО запуск насосів ініціюється автоматично відповідно до падіння тиску в системі, коли збільшується споживання води. Спочатку активізується насос №1, регулювання потужності якого відбувається за допомогою перетворювача частоти ПЧВ1, що діє як постійний майстер, залежно від водоспоживання в системі.

Коли насос №1 досягає своєї максимальної потужності та тиск у системі залишається недостатнім, включається насос №2. Цей насос може бути запущений безпосередньо з мережі або через пристрої плавного пуску УПП2, що є рекомендованим варіантом. Водночас, потужність насоса №1 знижується до мінімуму на основі сигналів від ПЧВ1, а двигун насоса №1 розганяється до досягнення встановленого тиску, який контролюється за допомогою датчика тиску ПД100И на виході станції.

Включення насоса №3 відбувається за аналогічним принципом, що і для насоса №2, забезпечуючи додаткове забезпечення тиску та потужності системи при високому водорозборі.

Якщо продуктивність насосної станції (ПНР) впадає до рівня менше 5% від проектної потужності та утримується на цьому рівні довше за встановлений час, що може бути заздалегідь визначений або заданий користувачем, то станція призупиняє роботу та переходить у сплячий режим.

У випадку виявлення несправності перетворювача частоти (ПЧВ), насос-майстер переходить у стан "Аварія насоса". Якщо основний насос-майстер вийшов з ладу або заблокований, контролер СУНА-122 відключає алгоритм "Постійний майстер" і активує другий та третій насоси за резервним алгоритмом. Коли основний насос відновлює свою працездатність, система знову переходить до роботи за алгоритмом "Постійний майстер".

Захист від "сухого" ходу здійснюється за допомогою аналогового сигналу від датчика тиску на вході насосної станції та/або дискретного сигналу від датчика "сухого" ходу. Ці сигнали забезпечують раннє попередження та можливість вчасно реагувати на зниження тиску чи відсутність рідини.

Всі аварійні події реєструються в журналі СУНА-122, який організований за принципом стека та може містити до 24 записів. Цей журнал допомагає слідкувати за історією подій і сприяє аналізу проблем.

Диспетчеризація об'єктів насосних станцій проводиться через хмарний сервіс за допомогою мережевих шлюзів, що дозволяє ефективно керувати станціями дистанційно та забезпечує неперервний моніторинг їхнього стану.

Система керування насосною станцією має наступні можливості:

- Увімкнення та вимкнення обладнання станції: дозволяє операторам контролювати запуск і зупинку устаткування залежно від потреб.
- Чергування роботи опорних насосів і вирівнювання часу наробітку: забезпечує рівномірне використання насосів, продовжуючи їх термін служби та ефективність.
- Каскадне керування насосною групою: оптимізує роботу декількох насосів, залучаючи додаткові насоси при збільшенні водоспоживання.
- Застосування частотного регулювання для зниження гідравлічних навантажень на систему: це допомагає зменшити знос обладнання і енергоспоживання.
- Захист насосів від аварій, таких як перегрів і «сухий» хід: гарантує безпеку системи та попереджає пошкодження обладнання.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		19

- Сигналізація про аварії: відображає та повідомляє про будь-які нештатні ситуації в реальному часі.
- Передача параметрів роботи обладнання на верхній рівень: забезпечує централізований нагляд та аналіз даних для управління та оптимізації процесів.
- Дистанційне керування системою через хмарний сервіс: дозволяє управляти станцією з будь-якої точки світу.
- Ведення журналу аварій через хмарний сервіс та архівування технологічних параметрів: забезпечує доступ до історичних даних для аналізу та планування обслуговування.

Ці можливості роблять систему гнучкою, надійною та легкою у керуванні, забезпечуючи високу продуктивність та ефективність насосної станції.

1.4.2 Регулювання тиску в системі водозабезпечення за допомогою головного та допоміжних насосів.

Головний насос отримує живлення від трифазного перетворювача частоти і функціонує в режимі стабілізації тиску, координуючись із датчиком технологічного параметра. У моменти підвищеного споживання води (наприклад, ввечері у житлових будинках), коли потужності одного насоса бракує, активізується додатковий насос через пристрій плавного пуску (ППП). Головний насос при цьому продовжує регулювати тиск. Коли споживання води зменшується (наприклад, вночі), швидкість головного насоса знижується, а додатковий насос, який не регулюється, вимикається, і система знову працює на одному насосі.

Особливості впровадження:

- Додатковий насос є нерегульованим і включається через ППП для уникнення гідроударів у водопровідній мережі.
- Зниження швидкості головного насоса, живленого від ПЧ, для уникнення гідравлічного удару в системі не передбачене, що дозволяє використовувати дану систему лише у водопровідних мережах з

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						20
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

накопичувальними резервуарами або при значній інерції споживання води.

- Система реалізована з використанням трифазного перетворювача частоти серії ESMD, оскільки однофазні перетворювачі не мають необхідного другого дискретного виходу для керування ППП.

Підключення перетворювача частоти проводиться згідно зі схемою.

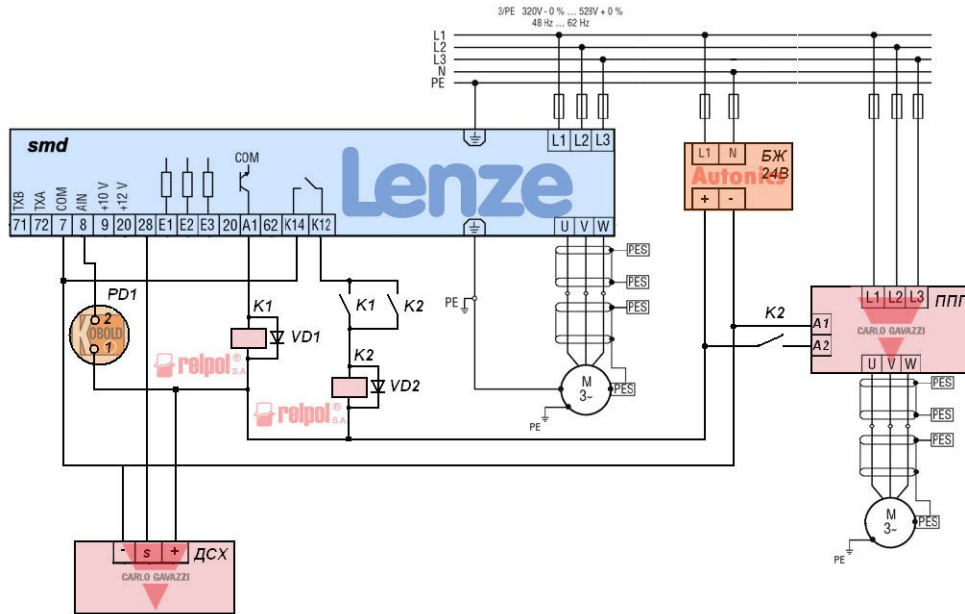


Рисунок 1.7 – Система стабілізації тиску в системі водопостачання за допомогою основного і додаткового насосів

Крім цього, необхідно виконати налаштування ПЧ під конкретне завдання з регулювання тиску.

### 1.5 Предмет проектування та опис існуючих проблем водопостачання

Перепади висоти по площі розташування будівель та споруд деяких міст є досить суттєвими. Ці особливості змушують використовувати в системі водоподачі такі об'єкти як малі насосні станції для забезпечення водоподачі на один або декілька висотних будинків. Нерівномірність розбору води в таких районах спричиняє значні коливання тиску в мережі та потребує постійного контролю за його величиною та здійснення регулювання режиму роботи

насосних агрегатів з метою підтримання величини вихідного тиску насосної станції в оптимальних значеннях.

Швидкий розвиток обширних міських житлових районів ставить завдання розширення та модернізації існуючих систем водопостачання. У міських районах подача води до житлових та комерційних закладів забезпечується за фіксованою швидкістю потоку води. Існують можливі випадки надмірного використання води деякими користувачами. Підтримання постійно оптимального тиску в мережі, знижує вірогідність поривів трубопроводів та забезпечує гарантоване отримання послуг споживачами.

Використання для цих цілей операторами насосних станцій дроселювання не може забезпечити точне дотримання режиму, є енергозатратним, та напряду залежить від дисциплінованості персоналу. Оптимальним технічним вирішенням виступає в цьому випадку облаштування системи автоматичного керування насосних станцій з їх диспетчеризацією за допомогою SCADA систем.

Система автоматичного керування(САК) пунктом розподілу питної води дільниці мікрорайону житлових будинків - це комплексна система, яка автоматизує процес розподілу та управління питною водою для житлових будинків у певному мікрорайоні. До подібної САК є наступний список вимог:

– Моніторинг витрати води:

Встановлення датчиків витрати води на вході та виході системи, які надають інформацію про кількість використаної води.

– Моніторинг витрати води:

Встановлення датчиків витрати води на вході та виході системи, які надають інформацію про кількість використаної води.

– Контроль тиску:

Моніторинг тиску в системі та автоматичне регулювання, щоб запобігти перепадам тиску та забезпечити стабільні умови водопостачання.

– Виявлення витоків:

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		22



Система виявляє витoki в системі водопостачання та надає сповіщення про них операторам для подальшого усунення.

– Збір та аналіз даних:

Збираються дані про витрату води, тиск, стан клапанів та інші параметри для подальшого аналізу та оптимізації роботи системи.

– Дистанційне керування та моніторинг:

Оператори можуть контролювати та керувати системою з віддаленої локації за допомогою спеціального програмного забезпечення або мобільного додатка.

Кожен з цих пунктів ми маємо поєднати, зв'язати та реалізувати за допомогою відповідних інструментів, обладнання, програмного забезпечення та необхідних знань для постійного обслуговування цієї системи автоматизації.

В насосних станціях систем водопостачання ключовою технологічною метою є підтримання сталого тиску у водорозподільчій системі, що досягається за допомогою контролю вихідних параметрів насосного устаткування різними методами. Постійний тиск у водопостачальній мережі забезпечує якісне обслуговування користувачів та продовжує строк служби технічного обладнання, знижуючи шкідливі наслідки, що виникають під час перехідних процесів, таких як кавітація та гідравлічні удари. Варіації тиску в системі можуть бути викликані різними причинами, включно зі зміною статичного опору, резистентністю мережі, моделлю споживання води, а також робочими графіками промислових підприємств. Для досягнення заданих технологічних стандартів зміни напору в мережі потрібно створити замкнену систему автоматичного регулювання (САР) параметрів насосного обладнання.

Аналізуючи даний об'єкт управління, можна констатувати, що він характеризується розподіленою структурою. Така специфіка об'єкта призводить до необхідності приділити особливу увагу по-створенню каналів зв'язку.

Існує два основних підходи до створення каналів зв'язку:

– Застосування кабельних ліній;

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		23

- Використання бездротових каналів зв'язку.

При використанні кабельних ліній зв'язку можуть виникати певні складнощі з кількох причин:

- Наявність багатьох об'єктів управління, розташованих на значних відстанях один від одного;
- Високі витрати на самі кабельні лінії зв'язку та їх інсталяцію;
- Обмежений об'єм даних, які передаються до або від кожного об'єкту управління;
- Необхідність вкладень у ремонт та підтримку цих ліній.

Використання комутованих телефонних ліній для передачі даних також стикається з проблемами, оскільки ці лінії часто не забезпечують достатньої надійності зв'язку. Проблеми з прямим дзвінком та нестабільна якість можуть перешкоджати своєчасній передачі аварійних сигналів від об'єкта.

Ці обмеження підкреслюють переваги використання систем передачі даних через радіоканали. Проте, застосування радіомодемів з виділеною частотою також супроводжується певними недоліками. Насамперед, потрібно ліцензувати частоти, що може бути складним і дорогим процесом. До того ж, для забезпечення широкого покриття території необхідно встановлювати репітери (ретранслятори).

Паралельно, при використанні частотного управління електроприводами, насосні агрегати можуть функціонувати безперервно у вигляді цілодобової роботи, працюючи в оптимальному режимі. Такий режим полягає у підтримці сталого тиску у мережі, незалежно від змін у рівні споживання води.

## 1.6 Постановка завдання

Водопостачальні системи мають важливе значення для забезпечення населення питною водою. Оскільки кожен об'єкт управління є частиною автоматизованої системи управління (АСУ), характеристики цієї системи в значній мірі залежать від параметрів самого об'єкта управління. Так, для

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		24

розробки ефективної та надійної АСУ, критично важливо глибоко розуміти статичні та динамічні властивості об'єкта.

Для забезпечення ефективності управління водопостачальними системами, пропонується розробити систему управління для насосних станцій, які обслуговують пункти контролю та розподілу питної води в багатоповерхових житлових будинках мікрорайонів. Ця система буде проектуватися з урахуванням специфічних вихідних даних і потреб кожного окремого мікрорайону:

- призначення будинків – житлові будинки;
- кількість будинків – 9;
- кількість поверхів - дев'ять;
- під'їзди – два;
- кількість мешканців у одному будинку – 210;
- гарантований напір у водопровідній мережі на будинок – 65 м;
- розрахункові секундні витрати при часових на будинок 9,6 л/год – 0,4 л/с;
- насосні станції – 3;
- насосів на станцію – 3;
- насосів гарячого резерву – 1;
- регульованих насосів на станцію -1.

Виходячи з вихідних даних, кожна насосна станція використовується в системі питного та протипожежного водопостачання житлових будинків багатоповерхової забудови, підприємств та закладів в мікрорайоні для підвищення напору в мережі до 65 м, забезпечуючи подачу питної води до 70 м<sup>3</sup>/год. Насосні станції працюють 24 години на добу. У машинному залі кожної насосної станції встановлено 3 насосних агрегати з одною установкою частотного регулювання (ПЗЧ).

Метою є розробити систему, яка забезпечить автоматичний контроль та оптимізацію розподілу питної води для мікрорайону з метою підвищення ефективності водопостачання та зменшення втрат води та електроенергії.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		25

- Необхідно розробити апаратну складову системи, яка включатиме датчики витрати води, датчики тиску, пристрої керування клапанами, контролери та інші необхідні компоненти.
- Реалізувати автоматичні алгоритми керування, які забезпечать оптимальний розподіл води в мікрорайоні з урахуванням змінних факторів, таких як витрата води, тиск і витоки.
- Забезпечити надійну роботу системи та збереження даних в разі відмови окремих компонентів або збоїв живлення.
- Провести уявні випробування та налагодження системи в умовах подібних до реальних у можливому мікрорайоні для перевірки її ефективності та надійності.

*Висновки за розділом:*

В даному розділі наведено опис технологічного процесу та об'єкту автоматизації. Виконано аналіз методів керування та існуючих систем автоматичного керування. Сформовано вимоги до систем автоматизації водопостачання.

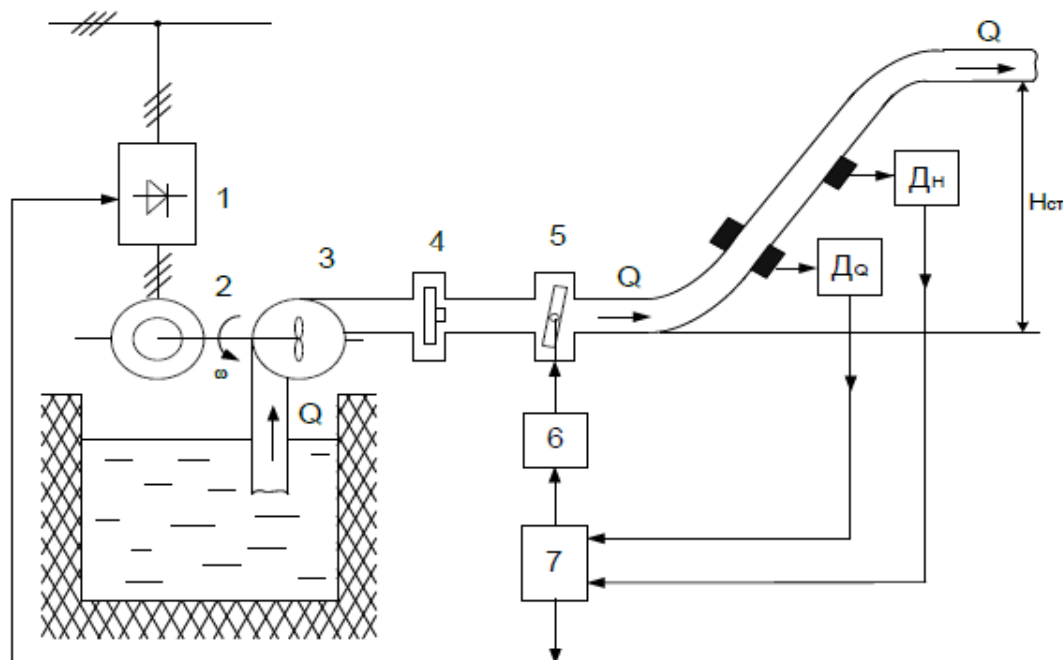
Автоматизація повинна забезпечувати управління насосними агрегатами без постійної присутності обслуговуючого персоналу, підвищувати надійність роботи станції, зберігати її обладнання і забезпечувати найбільш економічні режими роботи НС і всього обладнання в цілому.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.01.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		26

РОЗДІЛ 2  
МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

2.1 Розробка функціональної та структурної схеми САР стабілізації тиску в трубопроводі

До складу водопровідних гідротранспортних комплексів (ГТК) входять (рис. 2.1):



1 – перетворювач; 2 – асинхронний двигун;  
3 – насос; 4 – зворотний клапан; 5 – засувка;  
6 – виконуючий механізм; 7 - керуючий пристрій; ДQ – датчик витрати; Дп – датчик тиску

Рисунок 2.1 – Загальна схема насосного комплексу

- насосні станції з паралельно включеними НА, які приводяться в обертання асинхронними або синхронними електродвигунами потужністю від

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Романенко В.І.			РОЗДІЛ 2	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Савицький О.І.					23	37
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТ-20			
Затверд.		Трощ В.В.						

десятьківат до декількох мегават;

– запірно-регулююча та гідрозахисна арматура (вентилі, засувки, зворотні клапани, гасителі гідроударів і ін.), Що встановлюється як на виході НА, так і в трубопровідній мережі;

– розгалужена комунікаційна мережа трубопроводів великої протяжності;

– датчики тиску і витрати рідини, встановлені на виході насосної станції і в трубопровідній мережі.

### 2.1.1 Аналіз об'єкта управління

Об'єкт керування, в загальному випадку, можна представити такою функціональною схемою (рис. 2.2).

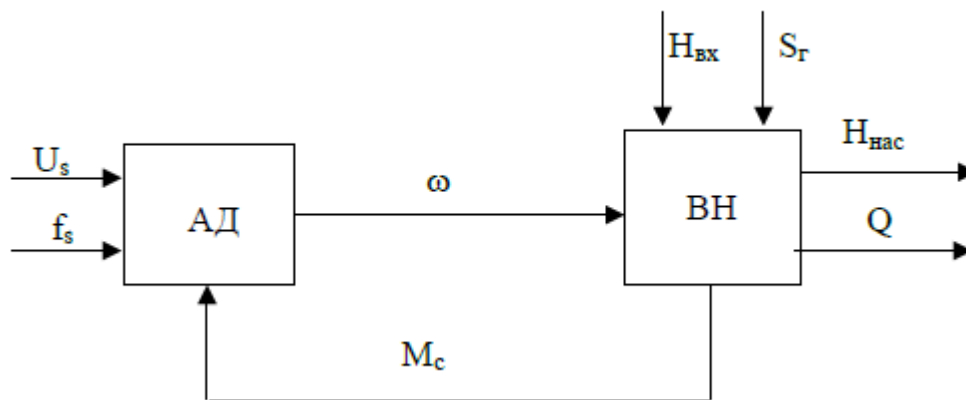


Рисунок 2.2–Функціональна схема насосного агрегату

На рисунку 2.2 прийняті наступні позначення

АД – асинхронний двигун; ВН – насос відцентровий;  $f_s$  – частота напруги, Гц;  $U_s$  – напруга статора, В;  $\omega$  – кутова швидкість ротора і робочого колеса насоса, рад/с;  $H_{вх}$  – напір на вході насоса, м;  $H_{нас}$  – напір на виході насоса, м;  $M_c$  – момент статичний на валу двигуна, Н\*м;  $Q$  – продуктивність насоса, м<sup>3</sup>/с;  $S_г$  – гідравлічний опір магістралі, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>.

Навантаження, яке виникає в результаті роботи відцентрових і осьових насосів, вентиляторів та інших механізмів цього типу, називається вентиляторним навантаженням. Статичний момент у таких механізмах

					КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змінюється залежно від швидкості обертання робочого колеса на другій стадії. Для отримання залежності моменту опору на валу двигуна від його швидкості обертання необхідно використовувати математичні формули, що описують характеристики насоса і трубопроводу.

Основні параметри насоса включають напір і подачу. Подача  $Q$  визначається як об'єм рідини, який насос перекачує за одиницю часу. Напір  $H$  визначається як різниця питомої енергії в 1 кг рідини між входом і виходом з насоса.

Насос можна описати наступним диференціальним рівнянням [14]:

$$\frac{m}{\rho g} \dot{Q} + s^2 (a + a_\phi) Q^2 = s^2 \frac{H_{0H}}{\omega_H^2} \omega^2 + s^2 H_{ст},$$

де  $m$  - маса води в системі (насос-трубопровід);  $\rho$  - щільність рідини;  $g$  - прискорення вільного падіння.

За допомогою цього рівняння можна скласти схему наведену на рисунку 2.3. Але ця схема за надто громіздка і вимагає врахування багато параметрів, які використовують при дослідженні динаміки рідин. Тому при розв'язку завдань автоматизації краще її лінеаризувати, застосовуючи для цього подібності (2.1).

$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{\omega_1}{\omega_2} \\ \frac{H_1}{H_2} &= \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Нехай  $Q_2 = Q_H$ ,  $H_2 = H_H$ ,  $\omega_2 = \omega_H$ :  $Q_1 = Q^*$ ,  $H_1 = H^*$ ,  $\omega_1 = \omega^*$ ,  
де  $Q_H$ ,  $H_H$ ,  $\omega_H$  - номінальні значення параметрів насосної установки;  $Q^*$ ,  $H^*$ ,  $\omega^*$  - поточні значення параметрів насосної установки.

Тоді рівняння (2.1) прийме вигляд (2.2):

$$\frac{Q_*}{Q_H} = \frac{\omega_*}{\omega_H}$$

$$\frac{H_*}{H_H} = \frac{\omega_*^2}{\omega_H^2} \quad (2.2)$$

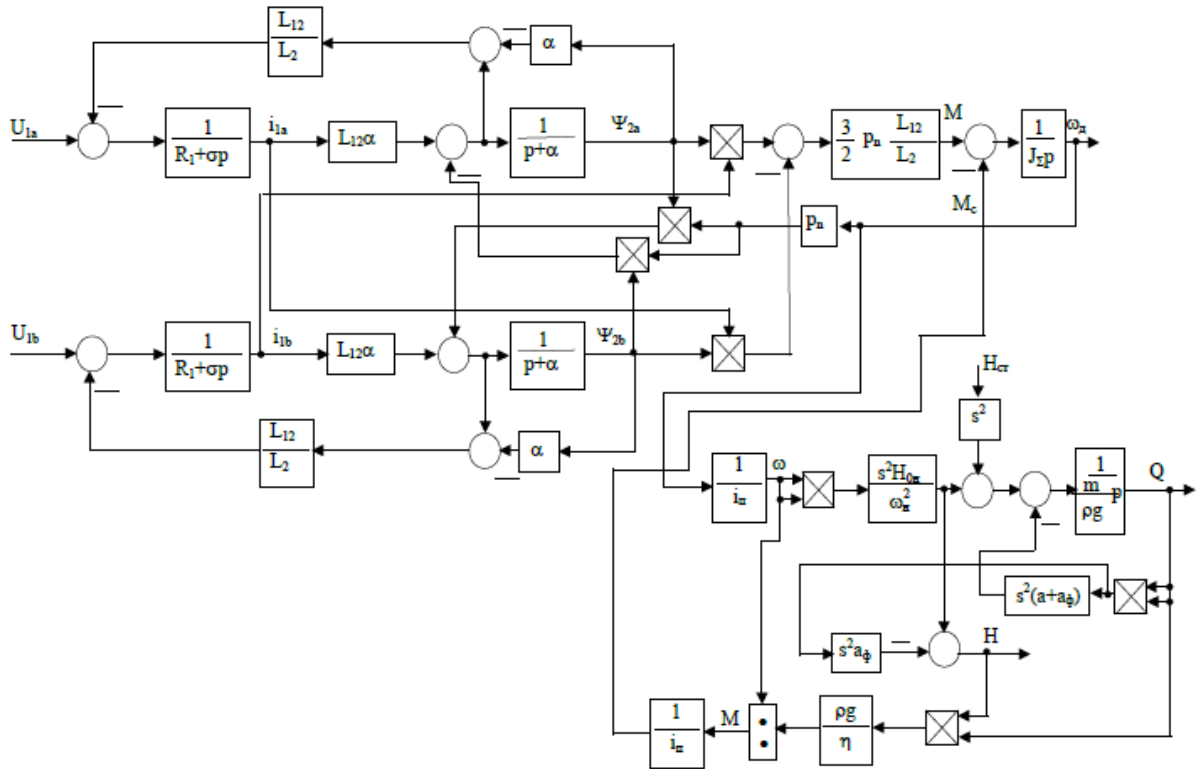


Рисунок 2.3 - Структурна схема насосної установки

Виразимо значення напору і подачі насоса через швидкість двигуна (2.3) і (2.4):

$$Q_* = \frac{Q_H}{\omega_H} \omega_* = k_1 \omega_* \quad (2.3)$$

$$H_* = \frac{H_H}{\omega_H^2} \omega_*^2 = k_2 \omega_*^2 \quad (2.4)$$

де  $k_1, k_2$  - постійні величини.

Якщо ігнорувати інерційність ПЧ та електромагнітних ланцюгів двигуна, виходячи з того, що їх значення на порядок менше за постійну часу технологічного об'єкта, і розглядаючи зв'язок між об'єктом та електроприводом через  $M_c$  з припущенням, що механічна характеристика двигуна має достатню



жорсткість, то структурну схему при управлінні  $H$  можна лінеаризувати у номінальній точці та спростити до вигляду (рис 2.4)

Візьмемо корінь з рівняння (2.5):

$$\sqrt{H_*} = k_{\text{насоса}} \omega_* \quad (2.5)$$

де  $k_{\text{насоса}}$  - коефіцієнт const.

$$k_{\text{насоса}} = \sqrt{\frac{H_H}{\omega_H^2}}$$

Насос та гідравлічна система є інерційними елементами, які можна описати як аперіодичні ланки першого порядку [14]:

$$W_{\text{нас}}(s) = \frac{k_{\text{нас}}}{T_{\text{нас}}s + 1} \quad (2.6)$$

де  $K_{\text{нас}} \sim$  коефіцієнт перетворення насосу,  $T_{\text{нас}}$  - постійна часу насоса.

Оскільки насос є нелінійною складною системою, а ми оперуємо з малими відхиленнями, ми можемо лінеаризувати його коефіцієнт передачі.

Значення  $T_{\text{нас}}$  становить 0,001 с [14]. Таким чином, при розробці системи з такою низькою часовою константою можна ігнорувати її і вважати насос безінерційним елементом:

$$W_{\text{нас}}(s) = k_{\text{нас}}$$

Модель насоса буде мати вигляд, наведений на рис. 2.4.

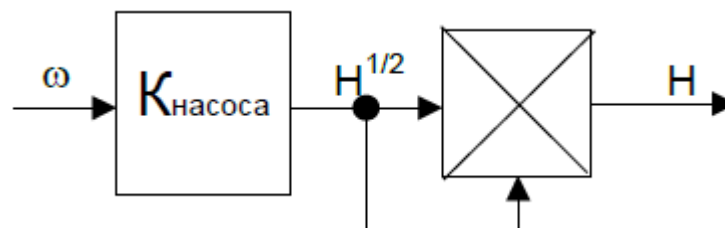


Рисунок 2.4 – Модель насоса

Тоді структурна схема системи автоматичного керування насосної установки представляє собою одноконтурну систему, в якій один зовнішній контур - контур тиску, який зображений на рис. 2.5:

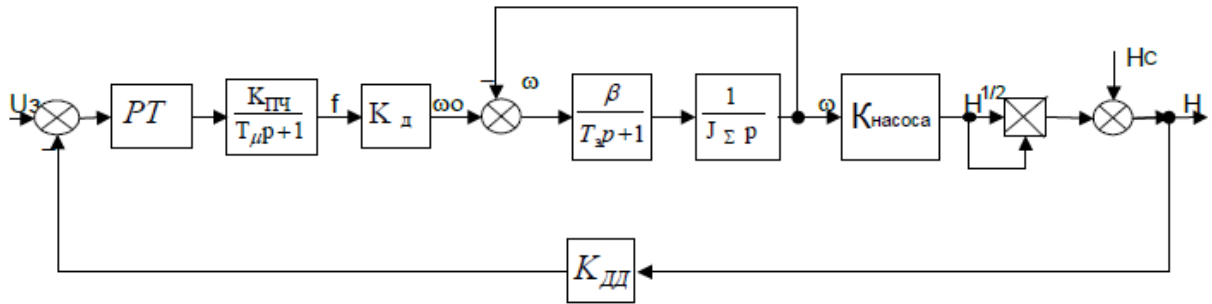


Рисунок 2.5 - Структурна схема САУ насоса

PT - регулятор тиску; K<sub>д</sub> - коефіцієнт передачі двигуна:

$$K_{д} = \frac{2\pi}{p} \quad (2.7)$$

K<sub>ДД</sub> - коефіцієнт зворотного зв'язку за тиском:

$$K_{ДД} = \frac{U_3}{H_H} \quad (2.8)$$

Вплив часової константи насоса на параметри перехідних процесів буде врахований під час моделювання системи.

### 2.1.2 Математична модель асинхронного короткозамкнутого електродвигуна

Математичний опис АД з короткозамкненим ротором і розробка його динамічної моделі виконується на основі T-подібної схеми заміщення.

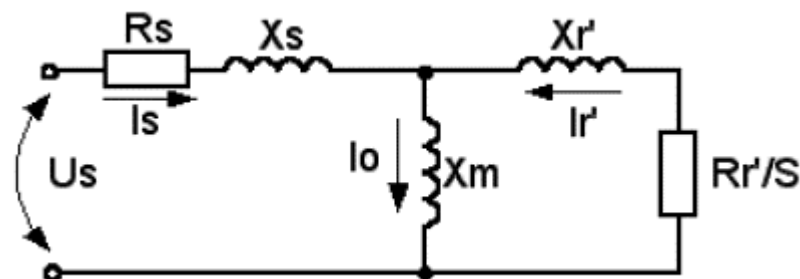


Рисунок 2.6 – Схема заміщення АД

Параметри схеми заміщення:

$$\begin{aligned} X_1 &= X'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} \\ X'_2 &= X''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} \\ R_1 &= R'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} \\ R'_2 &= R''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $X_\mu$  – індуктивний опір;  $R'_1, X'_1$  – активний й індуктивний опір обмоток статора;  $R'_2, X'_2$  – активний й індуктивний опір обмоток ротору;  $X_1, X'_2, R_1, R'_2$  – опори статора й ротору;  $U_{1\phi n}, I_{1\phi n}$  – номінальні значення фазної напруги та струму.

При математичному моделюванні асинхронного двигуна, як об'єкта керування використовуються такі припущення:

- сили намагнічення обмоток двигуна розподілені строго синусоїдально по периметру повітряного зазору;
- відсутні втрати «в сталі» статора та ротора;
- обмотки ротора і статора є строго симетричними зі зсувом вісі на  $120^\circ$ ;
- відсутнє насичення магнітного ланцюга.

Динамічна модель АД з КЗ у нерухомій системі координат статора (a-b) описується за допомогою системи з п'яти диференціальних рівнянь [15]:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\Psi_{2a} i_{1b} - \Psi_{2b} i_{1a}) - M_c \right] \\ \frac{di_{1a}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} i_{1a} - \alpha \beta L_m i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega p_n \psi_{2b} + \frac{U_{1a}}{\sigma} \end{aligned}$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma}i_{1b} - \alpha\beta L_m i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta\omega p_n\psi_{2a} + \frac{U_{1b}}{\sigma}$$

$$\frac{d\psi_{2a}}{dt} = -\alpha\psi_{2a} - \omega p_n\psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}$$

$$\frac{d\psi_{2b}}{dt} = -\alpha\psi_{2b} + \omega p_n\psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}$$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2} \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \quad L_1 = L_m + L_{1\sigma} \quad L_2 = L_m + L_{2\sigma}$$

де:  $\omega$  – кутова швидкість;  $M_c$ – момент навантаження;  $i_{1a}$ ,  $i_{1b}$ – компоненти вектору струма статора;  $\psi_{2a}$ ,  $\psi_{2b}$ – компоненти вектору потокозчеплення ротора;  $U_{1a}$ ,  $U_{1b}$ – компоненти вектору напруги статора;  $R_1$ ,  $R_2$ – активні опори статора й ротора;  $L_1$ ,  $L_2$ – індуктивності статора й ротора;  $L_{\sigma 1}$ ,  $L_{\sigma 2}$ – індуктивності розсіювання статора й ротора;  $L_m$ – індуктивність контуру намагнічення;  $p_n$ – число пар полюсів.

При стабілізації напору система функціонує при малих відхиленнях тому застосування лінійної моделі асинхронного двигуна є доцільним. Для розробки регуляторів системи керування використовується лінеаризована модель АД. Структурна схема цієї лінеаризованої моделі асинхронного двигуна представлена у формі моделі, зображеної на рис. 2.7:

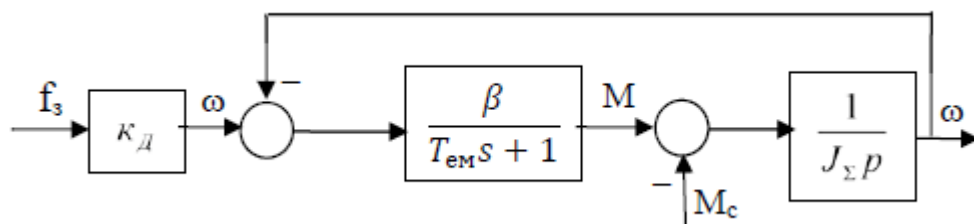


Рисунок 2.7 – Лінеаризована модель АД

де  $M$  – механічний момент двигуна, Н\*м;  $\beta$  – жорсткість лінійного участку механічної характеристики;  $T_{em}$  – електромагнітна стала часу, с;  $J_{\Sigma}$  – сумарний, приведений до валу двигуна момент інерції, кг\*с<sup>2</sup>;  $\omega_0$  – задаюча кутова частота обертання, рад/с;  $f_3$  – частота завдання, Гц,  $K_d$  – коефіцієнт передачі двигуна.

### 2.1.3 Динамічна модель перетворювача частоти

Компоненти перетворювача частоти з ланкою постійного струму включають керований випрямляч, фільтр та автономний інвертор напруги. Транзисторний перетворювач є нелінійним дискретним динамічним об'єктом з обмеженою можливістю маневрування, проте його специфіка як нелінійного об'єкта зазвичай не впливає значно на роботу системи. Частота зрізу регульовального контуру, у якому він функціонує, значно нижча за частоти, важливі для динаміки транзисторного перетворювача, при цьому час перехідних процесів в системі значно довший за період дискретизації системи. Зазвичай, при розробці систем керування електроприводами, випрямляч представляють як аперіодичну ланку з коефіцієнтом передачі  $K_B$  і постійною часу  $T_B$ , тоді як інвертор - як безінерційну ланку [15].

Для синтезу регуляторів системи керування буде використовуватися лінеаризована модель перетворювача частоти (рис. 2.8):

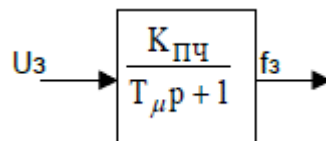


Рисунок 2.8 – Лінеаризована модель перетворювача частоти

де  $K_{ПЧ}$  – коефіцієнт посилення перетворювача частоти;  $T_{\mu}$  – постійна часу перетворювача частоти.

Для детальнішого розуміння перехідних процесів проведемо аналіз динаміки системи ПЧ-АД, використовуючи еквівалентну двофазну модель двигуна у векторній формі.

Математичний опис перетворення енергії в АД реалізується під час його роботи від мережі. Процес перетворення енергії в такому двигуні є складним завданням через значну нелінійність рівнянь, яка зумовлена взаємодією змінних.

Двигун, будучи трифазним, ускладнює математичний опис завдяки збільшенню кількості рівнянь. Тому процеси в багатофазних електричних

машинах часто представляють у вигляді еквівалентної двофазної моделі машини. Адекватність такого представлення забезпечується інваріантністю потужності машини під час перетворення рівнянь. У процесі моделювання кожен фізичний параметр двигуна, такий як напруга, струм чи потокозчеплення, представляється у формі вектора. Напрямок цих векторів жорстко зв'язаний з віссю координат відповідної обмотки, будь то статор чи ротор. Для статора використовується ортогональна система координат з вісями (a, b), а для ротора - вісі (d, q). Всі обчислювальні змінні представляються в системі координат (U, V). Перетворення реальних змінних двигуна з систем координат (a, b) чи (d, q) в обчислювальні (U, V) і навпаки виконується за допомогою проєкцій відповідних векторів змінних на ці вісі згідно з визначеними геометричними правилами.

Рівняння Кирхгофа для асинхронного двигуна має вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_c \psi_1 \quad (2.11)$$

$$0 = \dot{I}_2 R_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_c - \omega_{\text{вр}}) \psi_2 \quad (2.12)$$

де  $U_1$  – напруга статора;  $I_1, I_2$  – струм статора й ротора;  $R_1, R_2$  – активний електричний опір статора й ротора;  $\psi_1, \psi_2$  – потокозчеплення статора й ротора;  $\omega_{\text{вл}} = p_n \omega$  – кутова електрична швидкість;  $p_n$  – число пар полюсів двигуна;  $\omega$  – кутова швидкість двигуна.

Потокозчеплення статора й ротора визначається за допомогою наступних виразів:

$$\psi_1 = L_1 \dot{I}_1 + L_{12} \dot{I}_2 \quad (2.13)$$

$$\psi_2 = L_{12} \dot{I}_1 + L_2 \dot{I}_2 \quad (2.14)$$

де  $L_1, L_2, L_{12}$  – індуктивність обмотки статора, ротора й їх взаємоіндуктивність.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Вектори напруги, струмів й потокозчеплення представляються добутком проєкцій на вісі (U, V),

$$\dot{U}_1 = U_{1U} + jU_{1V}$$

$$\dot{I}_1 = i_{1U} + ji_{1V}$$

$$\dot{I}_2 = i_{2U} + ji_{2V}$$

$$\dot{\Psi}_1 = \Psi_{1U} + j\Psi_{1V} \quad \dot{\Psi}_2 = \Psi_{2U} + j\Psi_{2V}$$

З рівняння (2.14) визначаємо вирази для струму ротора

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{L_2} \dot{\Psi}_2 - \frac{L_{12}}{L_2} \dot{I}_1 \quad (2.15)$$

Після підстановки (2.12) у (2.10) отримаємо:

$$0 = \left( \frac{1}{L_2} \dot{\Psi}_2 - \frac{L_{12}}{L_2} \dot{I}_1 \right) R_2 + \frac{d\dot{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_c - \omega_{en}) \dot{\Psi}_2$$

або в операторній формі:

$$0 = \frac{R_2}{L_2} \dot{\Psi}_2 - \frac{L_{12}}{L_2} R_2 \dot{I}_1 + p\dot{\Psi}_2 + j(\omega_c - \omega_{en}) \dot{\Psi}_2$$

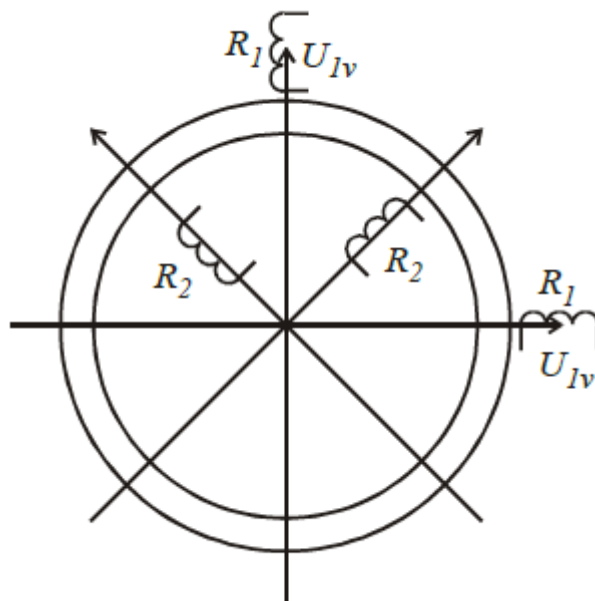


Рисунок 2.9 – Змінні в системі координат (U, V)

Зробимо заміну:  $\alpha=R_2/L_2$  , тоді рівняння остаточно прийме вигляд:

$$0 = (p + \alpha + j(\omega_c - \omega_{сл}))\dot{\psi}_2 - L_2\alpha\dot{I}_1 \quad (2.16)$$

З (2.12) з урахуванням (2.14) знаходимо вираз для потокозчеплення статора:

$$\dot{\psi}_1 = L_1\dot{I}_1 + L_{12}\left(\frac{1}{L_2}\dot{\psi}_2 - \frac{L_{12}}{L_2}\dot{I}_1\right) = \frac{L_1L_2 - L_{12}^2}{L_2}\dot{I}_1 + \frac{L_{12}}{L_2}\dot{\psi}_2 = \sigma\dot{I}_1 + \frac{L_{12}}{L_2}\dot{\psi}_2 \quad (2.17)$$

де

$$\sigma = \frac{(L_1L_2 - L_{12}^2)}{L_2}$$

Після підстановки (2.11) у (2.12), вираз для напруги прийме вигляд:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1R_1 + \frac{d}{dt}\left(\sigma\dot{I}_1 + \frac{L_{12}}{L_2}\dot{\psi}_2\right) + j\omega_c\left(\sigma\dot{I}_1 + \frac{L_{12}}{L_2}\dot{\psi}_2\right)$$

або в операторній формі:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1R_1 + p\sigma\dot{I}_1 + p\frac{L_{12}}{L_2}\dot{\psi}_2 + j\omega_c\sigma\dot{I}_1 + j\omega_c\frac{L_{12}}{L_2}\dot{\psi}_2$$

та остаточно:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(R_1 + \sigma(p + j\omega_c)) + \frac{L_{12}}{L_2}(p + j\omega_c)\dot{\psi}_2 \quad (2.18)$$

Після проведення аналогічних заміни для ланцюга ротора, ми отримуємо перетворену систему рівнянь, яка описує процеси в асинхронному двигуні. Ці рівняння дозволяють моделювати динаміку двигуна в умовах, що відповідають реальній роботі, з урахуванням перетворень координат та інших факторів, що впливають на його ефективність та стабільність:



$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1(R_1 + \sigma(p + j\omega_c)) + \frac{L_{12}}{L_2}(p + j\omega_c)\dot{\Psi}_2 \\ 0 &= (p + \alpha + j(\omega_c - \omega_{en}))\dot{\Psi}_2 - L_2\alpha\dot{I}_1 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Перше рівняння системи (2.19) у системі координат (U, V) прийме вигляд:

$$U_{1U} + jU_{1V} = (i_{1U} + ji_{1V})(R_1 + \sigma(p + j\omega_c)) + \frac{L_{12}}{L_2}(p + j\omega_c)(\Psi_{2U} + j\Psi_{2V})$$

або

$$\begin{aligned} U_{1U} + jU_{1V} &= (R_1 + \sigma p)i_{1U} + j(R_1 + \sigma p)i_{1V} + j\sigma\omega_c i_{1U} - \sigma\omega_c i_{1V} + \frac{L_{12}}{L_2}p\Psi_{2U} + \\ &+ j\frac{L_{12}}{L_2}\omega_c\Psi_{2U} + \frac{L_{12}}{L_2}p\Psi_{2V} - \frac{L_{12}}{L_2}\omega_c\Psi_{2V} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Проекції вектору напруги мають наступні значення:

$$\begin{aligned} U_{1U} &= (R_1 + \sigma p)i_{1U} - \sigma\omega_c i_{1V} + \frac{L_{12}}{L_2}p\Psi_{2U} - \frac{L_{12}}{L_2}\omega_c\Psi_{2V} \\ U_{1V} &= (R_1 + \sigma p)i_{1V} + \sigma\omega_c i_{1U} + \frac{L_{12}}{L_2}p\Psi_{2U} + \frac{L_{12}}{L_2}p\Psi_{2V} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Відповідно для другого рівняння системи (2.19):

$$0 = (p + \alpha + j(\omega_c - \omega_{en}))(\Psi_{2U} + j\Psi_{2V}) - L_{12}\alpha(i_{2U} + ji_{2V})$$

або

$$0 = (p + \alpha)\Psi_{2U} + j(\omega_c - \omega_{en})\Psi_{2U} + j(p + \alpha)\Psi_{2V} - (\omega_c - \omega_{en})\Psi_{2V} - L_{12}\alpha i_{2U} - jL_{12}\alpha i_{2V}$$

Проекції вектору мають наступні значення:

$$\begin{aligned} 0 &= (p + \alpha)\Psi_{2U} - (\omega_c - \omega_{en})\Psi_{2V} - L_{12}\alpha i_{2U} \\ 0 &= (p + \alpha)\Psi_{2V} - (\omega_c - \omega_{en})\Psi_{2U} - L_{12}\alpha i_{2V} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Перехід до системи координат ( $\alpha$ - $\beta$ ) відбувається за умови  $U=a$ ,  $V=b$ ,  $\omega_c=0$ . Після цього системи рівнянь (2.21) и (2.22) приймуть вигляд:

$$U_{1\alpha} = (R_1 + \sigma p)i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2} p \psi_{2\alpha} \quad (2.23)$$

$$U_{1\beta} = (R_1 + \sigma p)i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2} p \psi_{2\beta}$$

$$0 = (p + \alpha)\psi_{2\alpha} + \omega_{\text{ел}}\psi_{2\beta} - L_{12}\alpha i_{1\alpha} \quad (2.24)$$

$$0 = (p + \alpha)\psi_{2\beta} - \omega_{\text{ел}}\psi_{2\alpha} - L_{12}\alpha i_{1\beta}$$

З цих рівнянь визначають вирази для струмів, потокозчеплень та похідних:

$$i_{1\alpha} = \frac{1}{R_1 + \sigma p} \left[ U_{1\alpha} - \frac{L_{12}}{L_2} p \psi_{2\alpha} \right] \quad (2.25)$$

$$i_{1\beta} = \frac{1}{R_1 + \sigma p} \left[ U_{1\beta} - \frac{L_{12}}{L_2} p \psi_{2\beta} \right]$$

$$\psi_{2\alpha} = \frac{1}{p + \alpha} \left[ L_{12}\alpha i_{1\alpha} - \omega_{\text{ел}}\psi_{2\beta} \right] \quad (2.26)$$

$$\psi_{2\beta} = \frac{1}{p + \alpha} \left[ L_{12}\alpha i_{1\beta} - \omega_{\text{ел}}\psi_{2\alpha} \right]$$

$$\begin{aligned} p\psi_{2\alpha} &= L_{12}\alpha i_{1\alpha} - \omega_{\text{ел}}\psi_{2\beta} - \alpha\psi_{2\alpha} \\ p\psi_{2\beta} &= L_{12}\alpha i_{1\beta} + \omega_{\text{ел}}\psi_{2\alpha} - \alpha\psi_{2\beta} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Вираз для моменту асинхронного двигуна має вигляд:

$$M = \frac{3}{2} P_n L_{12} I_m (\dot{I}_1 \cdot \tilde{I}_2);$$

Добуток струмів дорівнює:

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 \cdot \tilde{I}_2 &= \dot{I}_1 \left( \frac{1}{L_2} \dot{\Psi}_2 - \frac{L_{12}}{L_2} \dot{I}_1 \right) = \frac{1}{L_2} \dot{I}_1 \dot{\Psi}_2 - \frac{L_{12}}{L_2} (\dot{i}_{1U}^2 + \dot{i}_{1V}^2) = \\ &= \frac{1}{L_2} (\dot{i}_{1U} + j\dot{i}_{1V})(\Psi_{2U} + j\Psi_{2V}) - \frac{L_{12}}{L_2} (\dot{i}_{1U}^2 + \dot{i}_{1V}^2) = \frac{1}{L_2} (\dot{i}_{1U}\Psi_{2U} + \Psi_{2V}\dot{i}_{1V}) + \\ &\quad + j\frac{1}{L_2} (-\dot{i}_{1U}\Psi_{2V} + \dot{i}_{1V}\Psi_{2U}) - \frac{L_{12}}{L_2} (\dot{i}_{1U}^2 + \dot{i}_{1V}^2); \end{aligned}$$

Тому вираз для моменту у координатах (U-V) прийме вигляд:

$$M = \frac{3}{2} P_n \frac{L_{12}}{L_2} (\dot{i}_{1V}\Psi_{1U} - \dot{i}_{1U}\Psi_{1V})$$

Після переходу до координат статора ( $\alpha$ - $\beta$ ) момент двигуна дорівнює:

$$M = \frac{3}{2} P_n \frac{L_{12}}{L_2} (\dot{i}_{1\beta}\Psi_{2\alpha} - \dot{i}_{1\alpha}\Psi_{2\beta}) \quad (2.28)$$

Механічна частина електродвигуна описується відомим рівнянням динаміки:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_c \quad (2.29)$$

де  $J_1$  – момент інерції електродвигуна;  $M_c$  – статичний момент.

Рівняння (2.15) – (2.21) представляють собою еквівалентну двофазну математичну модель асинхронного двигуна в координатах статора ( $\alpha$ - $\beta$ ). На рис. 2.10 представлена структурна схема двигуна, побудована на їх основі.

Трехфазний асинхронний двигун живиться від мережі симетричної синусоїдальної напруги:

$$\begin{aligned} U_A &= U_m \sin(2\pi f_1 t) \\ U_B &= U_m \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ U_C &= U_m \sin\left(2\pi f_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

де  $U_m$  – амплітуда напруги живлення;  $f_1$  – частота напруги живлення.

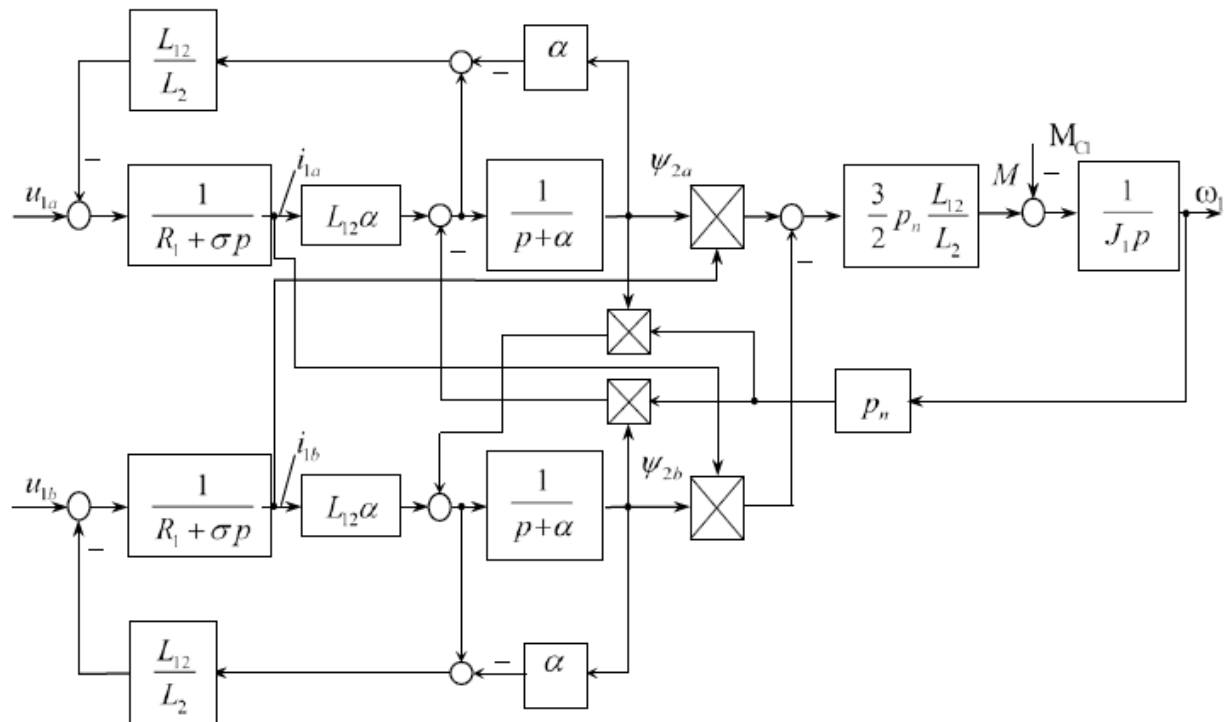


Рисунок 2.10 – Структурна схема асинхронного двигуна

Перехід до системи координат  $(\alpha-\beta)$  відбувається на основі відомих співвідношень (рис. 2.11)

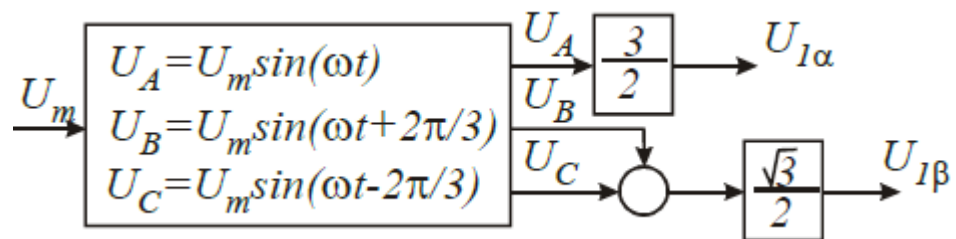


Рисунок 2.11 – Правило переходу з 3-ї до 2-ї системи координат

$$U_A + U_B + U_C = 0$$

$$U_{1\alpha} = U_A - U_C \cos 60^\circ - U_B \cos 60^\circ = U_A - (U_C + U_B) = \frac{3}{2} U_A$$

$$U_{1\beta} = U_B \cos 30^\circ - U_C \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} (U_B - U_C)$$

Структурна схема описаного перетворення представлена на рисунку 2.12. При цьому амплітуда напруги, що живить двигун, визначається величиною  $U_m$ , а частота напруги -  $f_1$ .

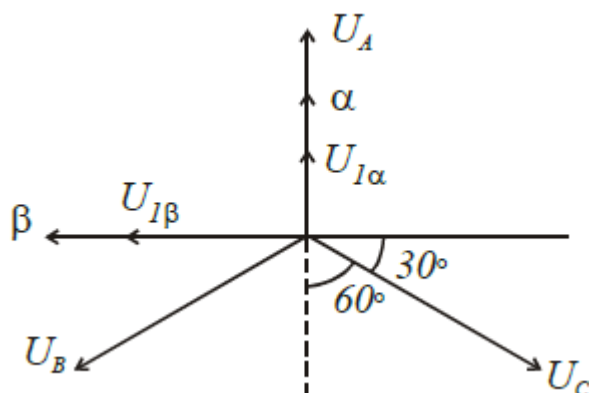


Рисунок 2.12 – Еквівалентна двофазна напруга живлення двигуна

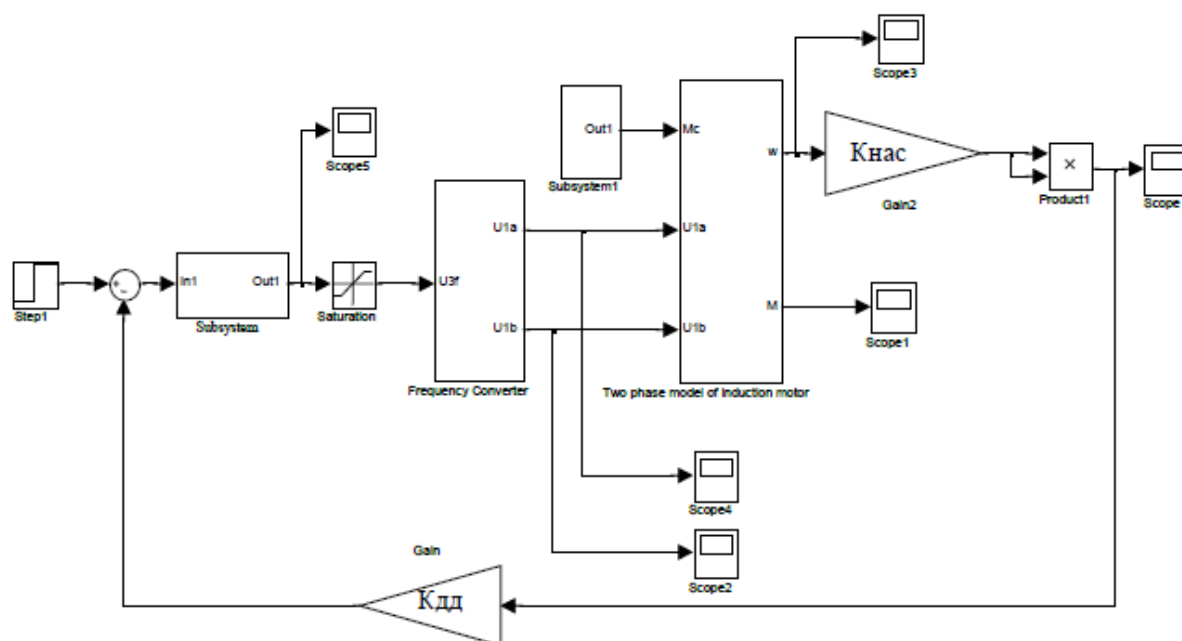


Рисунок 2.13 – Структурна схема ПЧ-АД еквівалентної 2-ї моделі двигуна у векторній формі

## 2.2 Математичне забезпечення

### 2.2.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення електродвигуна

$$X_1 = X'_1 \frac{U_{1\phi_H}}{I_{1\phi_H}} = 0,122 \frac{220}{202} = 0,133$$

$$X'_2 = X''_2 \frac{U_{1\phi_H}}{I_{1\phi_H}} = 0,16 \frac{220}{202} = 0,1743$$

$$R_1 = R'_1 \frac{U_{1\phi_H}}{I_{1\phi_H}} = 0,023 \frac{220}{202} = 0,025$$

$$R'_2 = R''_2 \frac{U_{1\phi_H}}{I_{1\phi_H}} = 0,019 \frac{220}{202} = 0,0207$$

$$X_{12} = X_{\mu} \frac{U_{1\phi}}{I_{1\phi}} = 4,9 \frac{220}{202} = 5,34$$

де  $I_{1\phi_H}$  – номінальний струм статора

$$I_{1\phi_H} = \frac{P_H}{3U_{1\phi_H} \cos\varphi\eta} = \frac{110000}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,951} = 202, \text{ A}$$

Взаємна індуктивність статора й ротора:

$$L_{12} = \frac{X_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_i} = \frac{5,34}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,017 \text{ Гн}$$

Індуктивність статора:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_i} = \frac{0,133 + 5,34}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0174 \text{ Гн}$$

Індуктивність ротора:

$$L_2 = \frac{X'_2 + X_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_i} = \frac{0,1743 + 5,34}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0176 \text{ Гн}$$

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2} = \frac{0,0174 \cdot 0,0176 - 0,017^2}{0,017} = 0,00101$$

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

$$\alpha = \frac{R_2'}{L_2} = \frac{0,0207}{0,0176} = 1,176$$

Коефіцієнт передачі:

$$i_n = 1$$

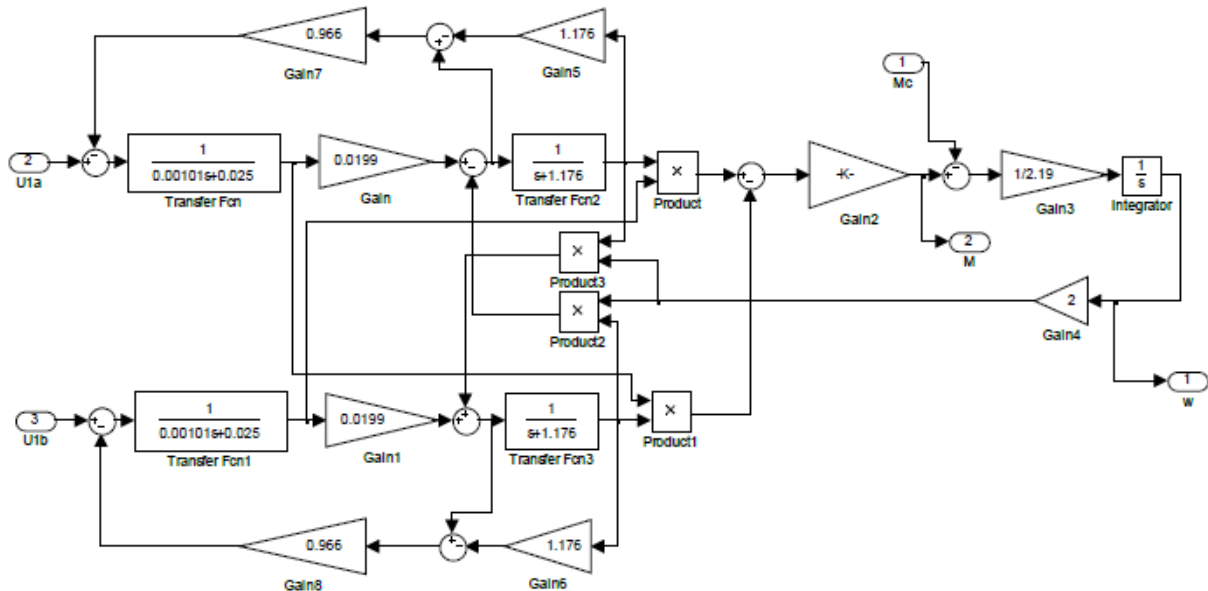


Рисунок 2.14 – Структурна схема асинхронного двигуна з розрахованими параметрами заміщення

### 2.2.2 Розрахунок параметрів перетворювача частоти

$$W_{\text{ПЧ}}(s) = \frac{K_{\text{ПЧ}}}{T_{\mu}s+1} = \frac{3,125}{0,01s+1}$$

де  $K_{\text{ПЧ}} = f_{1H}/I_3 = 50/16 = 3,125$  Гц/мА – коефіцієнт посилення перетворювача частоти,

$f_{1H} = 50$  Гц – номінальна частота напруги мережі,

$I_3 = 16$  мА – струм завдання, приймається стандартним  $(20-4) = 16$  мА

$T_{\mu} = 0,01$  с, постійна часу перетворювача частоти.

Для реальних систем  $T_{\mu} = 0,008 \div 0,01$  с, для синтезу приймаємо  $T_{\mu} = 0,01$ .

### 2.2.3 Розрахунок номінальних параметрів насосної установки

Швидкість холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_{1H}}{\delta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с}$$

Швидкість двигуна:

$$\omega_i = \omega_0(1 - s_H),$$

Ковзання двигуна:

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_i}{\omega_0} = \frac{157 - 152,77}{157} = 0,03$$

Ковзання критичне:

$$s_K = s_H(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,03 \cdot (2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,14$$

де  $\lambda=2,4$  — це коефіцієнт, що вказує на відношення максимального моменту двигуна до його номінального моменту.

$K_D$  - коефіцієнт передачі двигуна визначає ефективність передачі енергії від двигуна до механізму, з яким він взаємодіє:

$$K_D = \frac{2\pi}{p} = \frac{6,28}{2} = 3,14$$

Постійна електромагнітна часу двигуна:

$$T_m = \frac{1}{2\pi f s_k} = \frac{1}{314 \cdot 0,14} = 0,022$$

Модуль статичної жорсткості:

$$\beta = \frac{I_1}{\omega_{11} - \omega_1} = \frac{707}{157 - 152,77} = 167,14$$

Момент інерції сумарний:

$$J_\Sigma = J_D + J_{\text{нас}} = 2,19 + 1,91 = 4,1 \text{ кгм}^2$$

Постійна електромеханічна часу двигуна:

$$T_e = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{4,1}{167,14} = 0,025$$

де  $J_\Sigma=4,1 \text{ кг м}^2$

Число пар полюсів обмотки статора двигуна:

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



$$p = 2$$

На основі отриманих параметрів, передаточна функція двигуна буде мати вигляд:

$$W_{ad}(s) = \frac{\beta \cdot k_d}{J_{\Sigma} T_m s^2 + J_{\Sigma} s + \beta} = \frac{k_d}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1} = \frac{3.14}{0.000055 s^2 + 0.025 s + 1}$$

Для системи регулювання напору критичною складовою є датчик тиску. Його вибір залежить від номінального напору насоса, який необхідно перерахувати у тиск. Для перетворення напору насоса в тиск можна використовувати наступну формулу:

$$P_N = g \rho_{\bar{a}\bar{a}} H_N = 9,81 \cdot 1000 \cdot 65 = 0,64 \text{ МПа} \quad (2.30)$$

Обираємо датчик типу Метран 100ДИ на максимальний тиск 1 МПа. Минимальний тиск датчика 0 МПа. З метою підвищення заводозахисності, датчик тиску має струмовий інтерфейс. У системах регулювання, де інформація передається у вигляді струму, часто використовується стандартний діапазон 4-20 мА. Це означає, що при мінімальному тиску датчик видає струм 4 мА, а при максимальному тиску - 20 мА. Цей діапазон дозволяє системі регулювання чітко відслідковувати зміни тиску за струмовим сигналом, що відповідає конкретним значенням тиску, тим самим забезпечуючи точне керування процесом.

Максимальний напір, виміряний датчиком:

$$H_{\bar{a}, H_{\max}} = \frac{10^6}{9,81 \cdot 1000} = 101,937 \text{ м.} \quad (2.31)$$

Отже коефіцієнт передачі датчика тиску:

$$K_{dd} = \frac{I_{H\max} - I_{H\min}}{H_{H\max} - H_{H\min}} = \frac{20 - 4}{101.937 - 0} = 0.0157. \quad (2.32)$$

Так як завдання напору на регулятор також приходить у вигляді струму з максимальною величиною 20 мА, а мінімальна 4 мА, тому вводимо масштабний коефіцієнт:

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_{dн} = \frac{1}{K_{dd}} = \frac{1}{0.157} = 6.369 \quad (2.33)$$

### 2.3 Синтез контуру регулювання тиску

Синтез контур регулювання тиску проведемо методом послідовної корекції. Налаштування контуру регулювання виконаємо на модульний оптимум.

Передаточна функція об'єкта регулювання (без регулятора і датчика тиску) буде мати вигляд:

$$W_{ok}(s) = W_H(s)W_{пч}(s)W_{ad}(s) \quad (2.34)$$

$$W_{ok}(s) = \frac{K_{пч}K_dK_{dd}}{(T_\mu s + 1)(T_e T_m s^2 + T_m s + 1)}$$

При синтезі регулятора тиску часто застосовують підхід, який включає визначення бажаної передавальної функції для розімкнутої системи. Основною метою є компенсація великих постійних часу об'єкта керування, що дозволяє виключити їх вплив з розімкнутого контуру регулювання. Таким чином, система може швидше реагувати на зміни без затримки, що спричинена інерційністю цих постійних часу.

Аналогічно, можна виключити з розімкнутої системи всі коефіцієнти посилення, що оптимізує відгук системи на зовнішні зміни та пом'якшує вплив перепадів. Введення інтегруючого елемента з малою постійною часу до контуру регулювання дозволяє усунути статичну помилку, забезпечуючи високу точність в підтримці заданого тиску в системі. Це особливо важливо в динамічних умовах, де тривала точність є критичною.

У процесі оптимізації системи регулювання тиску, розімкнутий контур може бути замінений результуючим контуром, який характеризується загальним коефіцієнтом посилення, що дорівнює  $1/K_{dd}$  (де  $K_{dd}$  не дорівнює

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одиниці). Цей підхід дозволяє домогтися астатизму першого порядку, що забезпечує високу точність регулювання без статичної помилки.

Така конфігурація регулятора забезпечує високу швидкість реакції системи, оскільки вона ігнорує малі постійні часу, які не були компенсовані. Завдяки цьому, система стає більш чутливою до змін в умовах експлуатації та здатною швидко коригувати параметри для підтримки заданого рівня тиску. Це важливо для динамічних додатків, де необхідно підтримувати стабільність параметрів незважаючи на зміни зовнішнього навантаження або інші варіабельні умови.

Тобто, бажана передатна функція розімкнутої системи має вигляд (настройка на модульний оптимум):

$$W_{rs}(s) = \frac{1/K_{dd}}{2T_{\mu}s(T_{\mu}s+1)} \quad (2.35)$$

Тоді передаточна функція регулятора буде мати наступний вигляд:

$$W_{рт}(s) = \frac{W_{rs}(s)}{W_{ок}(s)} = \frac{\frac{1/K_{dd}}{2T_{\mu}s(T_{\mu}s+1)}}{\frac{K_{пч}K_dK_{dd}}{(T_{\mu}s+1)(T_eT_ms^2+T_ms+1)}} = \frac{(T_eT_ms^2+T_ms+1)}{2T_{\mu}s \cdot K_{пч}K_dK_{dd}} \quad (2.36)$$

де  $T_{\mu}$  – найменша, некомпенсуєма стала часу.

Згідно з описом, передавальна функція, належить до категорії пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів, відомих як ПІД-регулятори. Ці регулятори характеризуються трьома основними параметрами:

Пропорційний коефіцієнт ( $k_p$ ), який визначає реакцію системи на поточну помилку. Більше значення  $k_p$  призводить до швидшої реакції системи, але також може збільшити ймовірність перерегулювання.

Інтегральний коефіцієнт ( $k_i$ ), який допомагає усунути постійну помилку в системі, інтегруючи помилку з часом і додаючи результат до вихідного сигналу регулятора. Це сприяє тому, що система дійсно досягає заданого значення.

Диференціальний коефіцієнт ( $k_d$ ), який впливає на регулятор на основі швидкості зміни помилки. Це зменшує потенційні перерегулювання і

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коливання, роблячи систему стабільнішою і менш чутливою до миттєвих змін помилки.

ПІД-регулятор використовується для того, щоб забезпечити оптимальний контроль, коректуючи відхилення від заданого значення шляхом адаптації до змін умов в реальному часі, що робить його вкрай популярним у багатьох прикладних областях.

Складові ПІД регулятора тиску визначаються:

$$k_p = \frac{T_m}{2 \cdot k_{dH} \cdot k_d \cdot k_{ad} \cdot k_{dd}} = \frac{0.025}{2 \times 3.125 \times 3.14 \times 0.693 \times 0.157} = 0.002,$$

$$k_I = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot k_{dH} \cdot k_{ad} \cdot k_{dd} \cdot k_{пч}} = \frac{1}{2 \times 0.01 \times 3.125 \times 0.693 \times 0.157} = 9.7,$$

$$k_d = \frac{T_m \cdot T_e}{2 \cdot T_\mu \cdot k_{dH} \cdot k_{dd} \cdot k_{пч}} = \frac{0.025}{2 \times 0.01 \times 3.125 \times 3.14 \times 0.157} = 0.027$$

Після підстановки отримаємо:

Регулятор тиску реалізуємо за допомогою програмного універсального ПІД-регулятора, який наведено на рис. 2.15

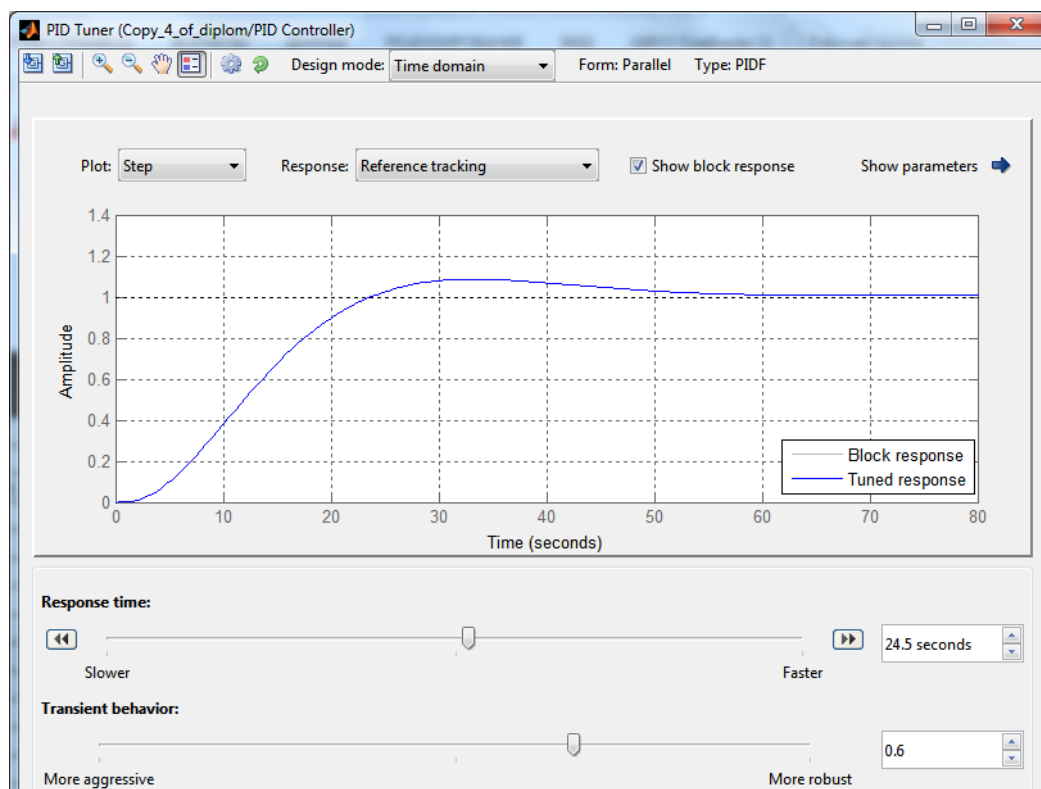


Рисунок 2.15 – Розрахунок параметрів регулятора

Після проведення всіх налаштування та розрахунків параметрів регулятора, було виконано моделювання всієї системи керування в цілому та побудовано перехідний процес, який показано на рисунку 2.17.

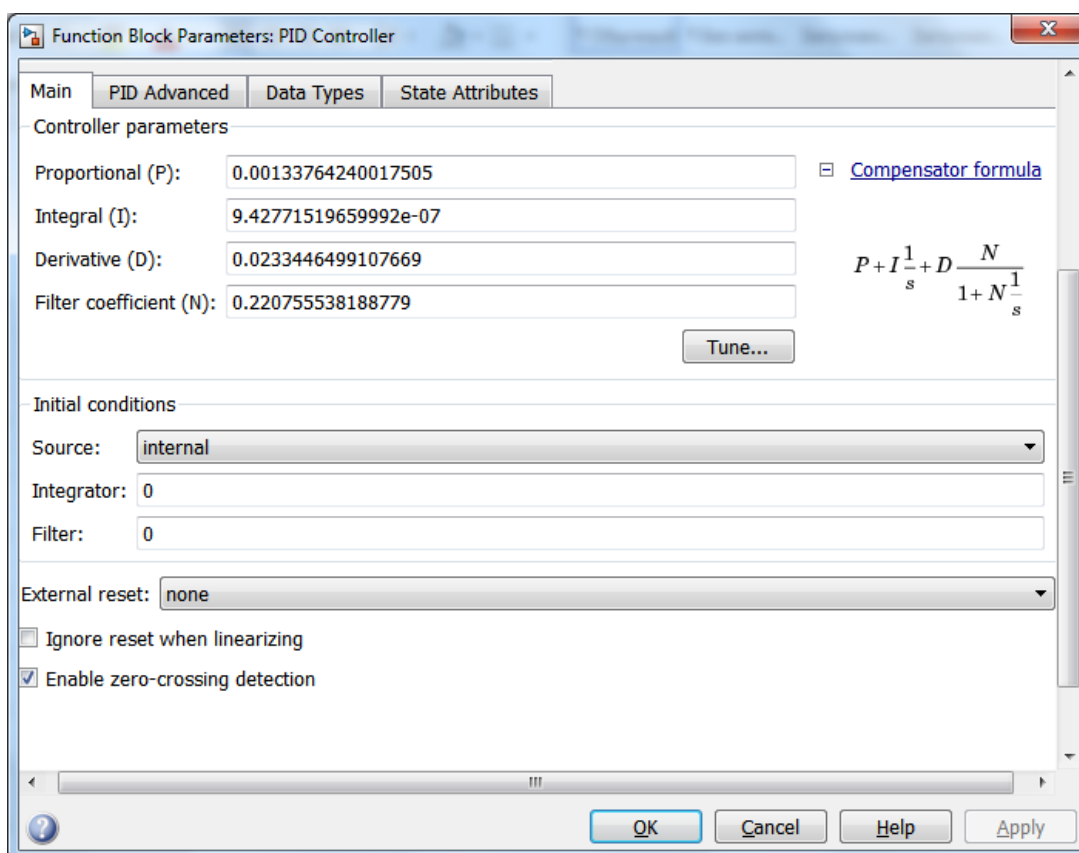


Рисунок 2.16 – Розраховані параметри ПІД-регулятора

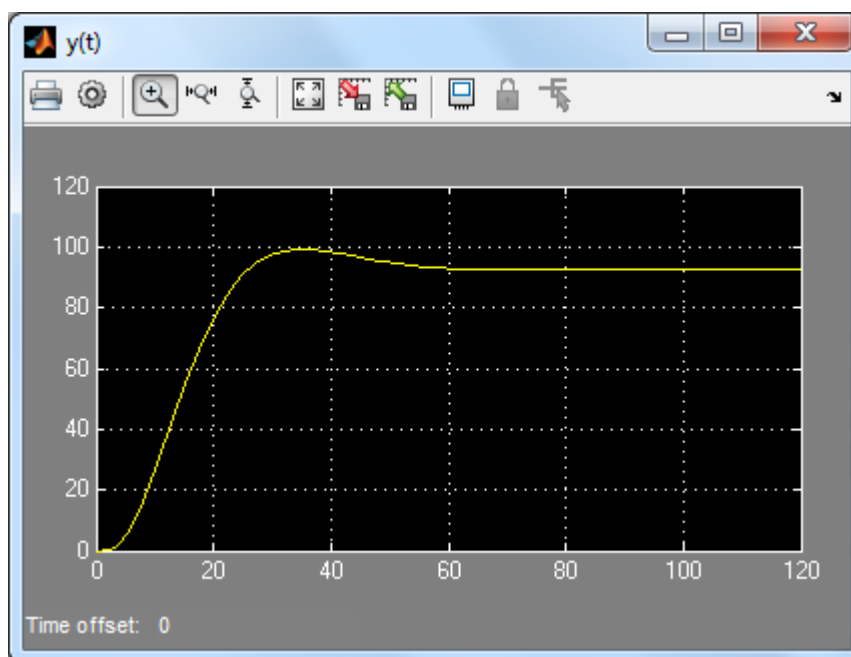


Рисунок 2.17 – Перехідний процес стабілізації тиску в магістралі

Як можна побачити, розраховані параметри регулятора практично співпадають с параметрами отриманими за допомогою PID Tuner.

## 2.4 Дослідження динаміки САК насосної установки

Для створення моделі системи керування насосною станцією будемо використовувати модуль SIMULINK, який є частиною програмного комплексу MATLAB. Варто зазначити, що в реальних умовах запуск насосної станції та зміни тиску у споживчій мережі відбуваються не раптово, а досить плавно і поступово. Основною метою цього розділу є аналіз роботи станції в критичних умовах та перевірка коректності розробки регулятора. Аналіз перехідних процесів в системі стабілізації тиску виконується за допомогою спрощеної моделі з урахуванням часової константи насоса.

У модулі Simulink було створено модель насосної установки, яка дозволяє проводити моделювання, враховуючи або ігноруючи обмеження регулятора тиску, із можливістю подання на вхід системи завдань різного типу. Діаграма моделі системи автоматичного управління насосною станцією представлена на рисунку 2.18.

Зробимо аналіз системи в наступних режимах без обмеження регулятора тиску і з обмеженням:

- Наброс навантаження, що дорівнює  $M_c = 0,9 * 0,707 = 636,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .;
- Плавний пуск від задатчика інтенсивністю та набросу навантаження;
- Пуск стрибком на холостому ходу ( $M_c = 0$ ).

В даній роботі прийнято, що вплив гідромережі на АД враховується ступінчастим характером набросу  $M_c$ . Оскільки параметри гідромережі визначаються її специфічною конфігурацією і зазвичай забезпечують плавне наростання моменту сили ( $M_c$ ), ця ситуація може бути особливо складною для системи керування. Управління плавним наростанням моменту сили вимагає точно налаштованих регулювальних механізмів, здатних адаптуватися до змін у властивостях гідромережі, що може включати змінну швидкість потоку, тиск,

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

а також інші динамічні змінні. Це робить сценарій особливо складним для оптимізації роботи насосної установки та підтримання заданих параметрів ефективності.

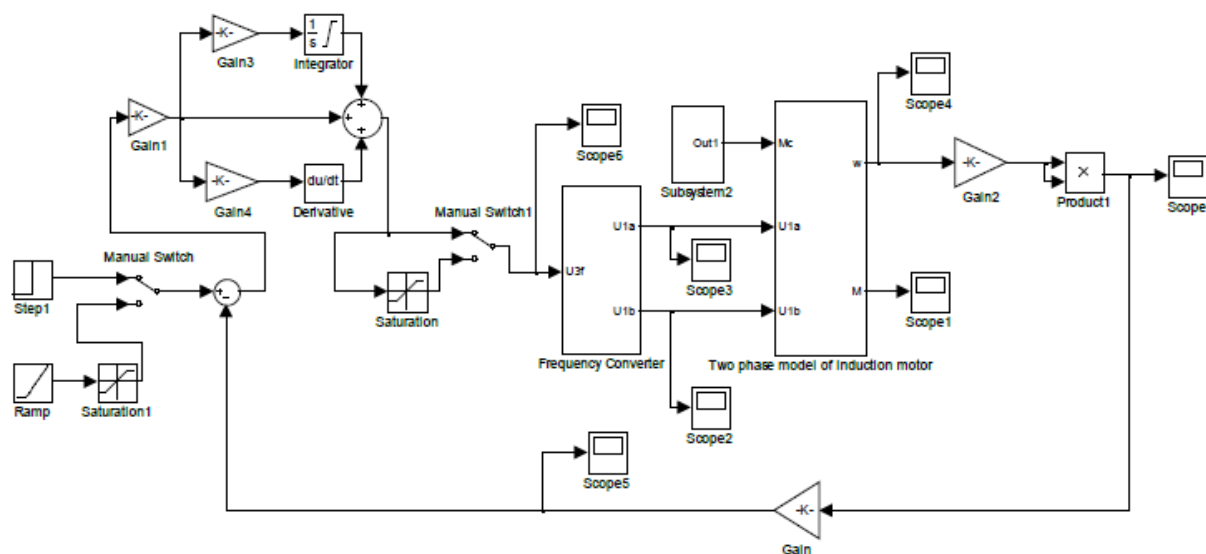


Рисунок 2.18 – Схема моделі САК

У розробленій моделі системи насосної установки в Simulink використовуються спеціальні блоки для управління та аналізу різних режимів роботи системи, що дозволяє адаптувати її до конкретних умов експлуатації.

Блок Saturation використовується для обліку обмежень, встановлюючи максимальний рівень вихідного сигналу. У вашому випадку обмеження встановлене на рівні 20, що допомагає уникнути перевантаження системи при екстремальних умовах.

Manual Switch-1 використовується для комутації між різними режимами вхідного сигналу: стрибком або задатчиком інтенсивності, що дозволяє симулювати плавне зростання сигналу до заданого рівня.

Manual Switch-2 активує режим обмеження, що дає можливість аналізувати систему в умовах, коли діє обмеження вихідного сигналу.

Manual Switch-3 забезпечує наброс навантаження, дозволяючи тестувати систему в умовах раптового зміни навантаження.

Модель системи включає також інші компоненти, які забезпечують її працездатність та візуалізацію результатів моделювання. На графіку рис. 2.19

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

ви можете бачити зміни тиску при реакції на вхідний стрибок без врахування обмежень на виході регулятора тиску. Також, на рис. 2.26 представлені графіки, які демонструють реакцію системи на плавне наростання сигналу завдання без врахування обмежень.

Ці інструменти та візуалізації допомагають визначити оптимальні параметри для регулятора та адаптувати систему до реальних умов експлуатації, аналізуючи її поведінку в критичних режимах.

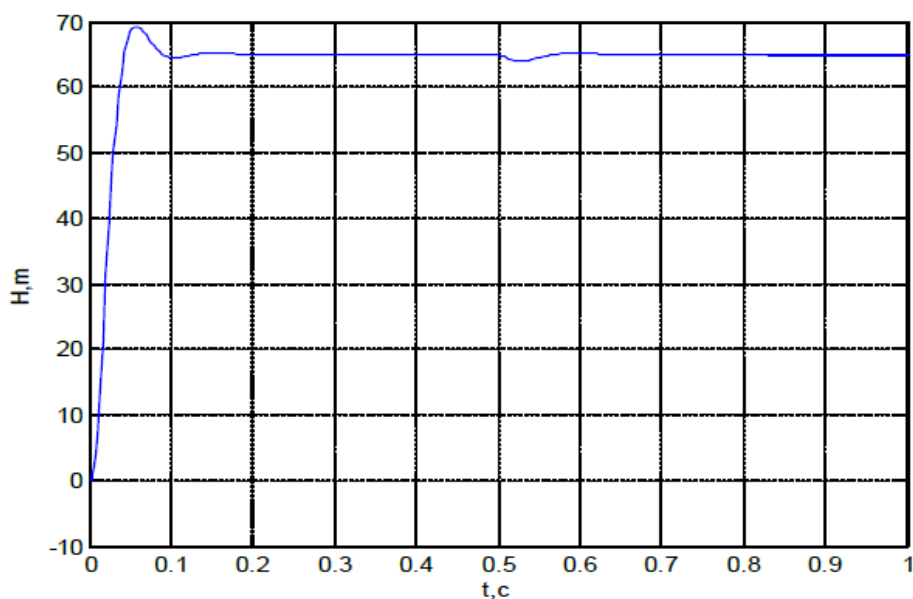


Рисунок 2.19 – Перехідний процес зміни тиску (реакція на стрибок сигналу завдання і накиді навантаження)

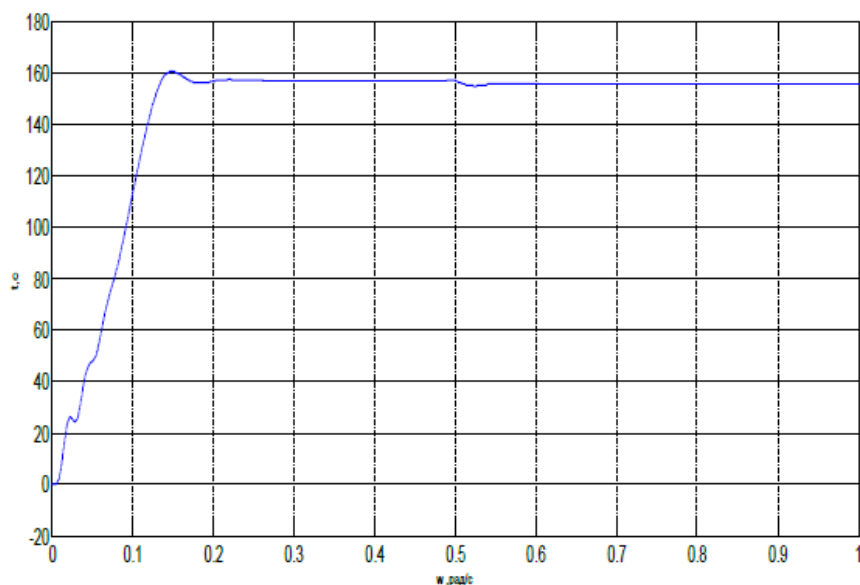


Рисунок 2.20 – Перехідний процес зміни швидкості (реакція на стрибок сигналу завдання і накид навантаження)



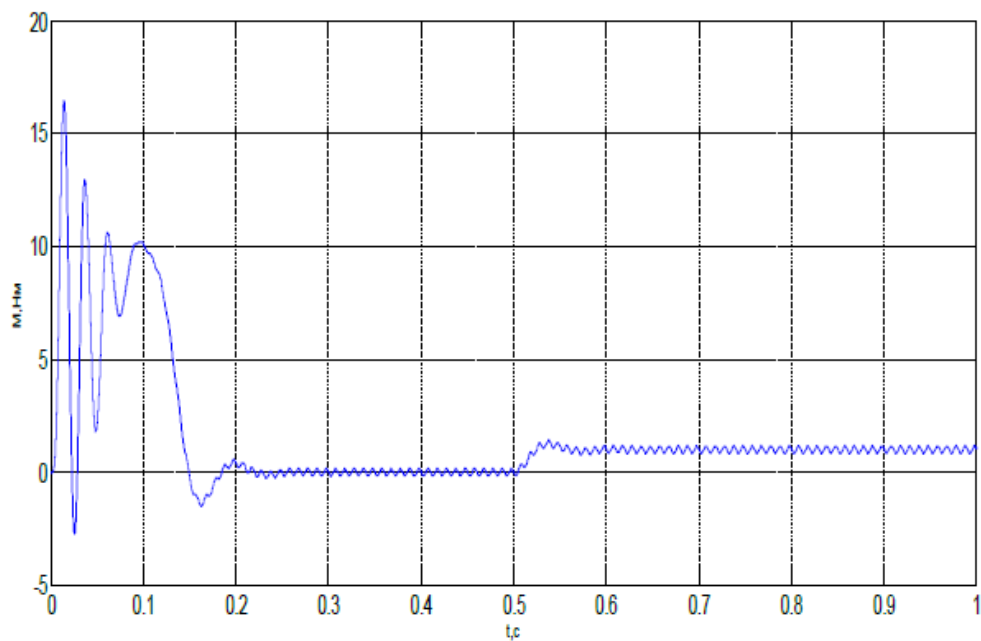


Рисунок 2.21 – Перехідний процес зміни швидкості (реакція на стрибок сигналу завдання і накид навантаження)

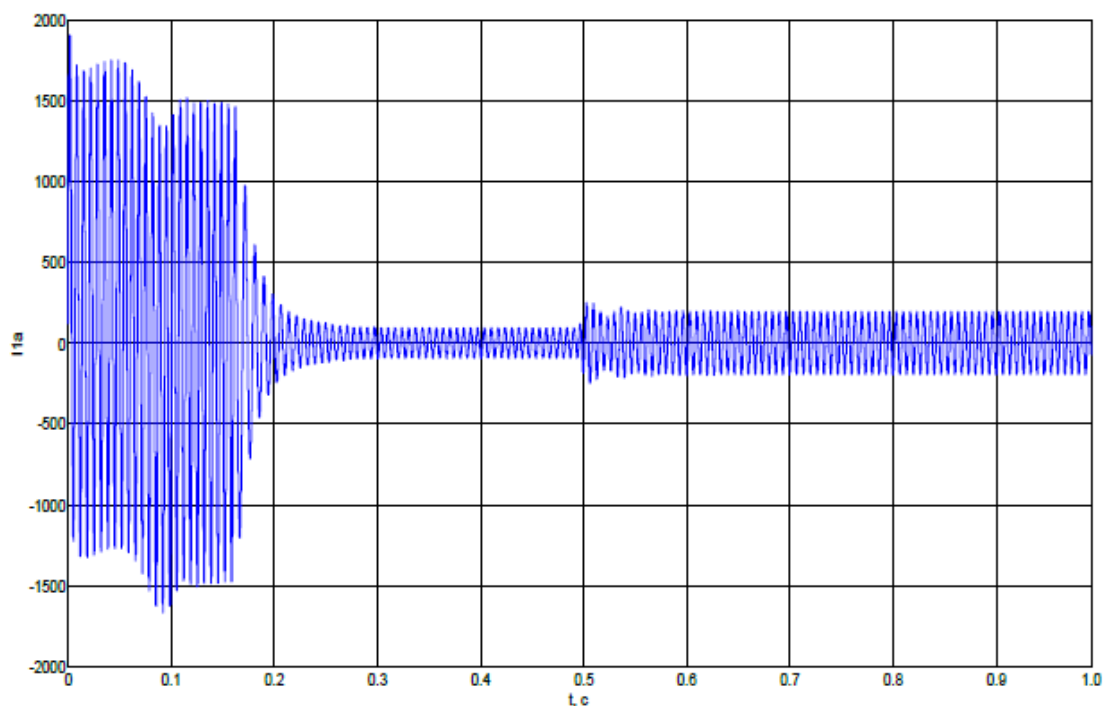


Рисунок 2.22 – Перехідний процес зміни струму фази Іа (реакція на стрибок сигналу завдання і накид навантаження)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

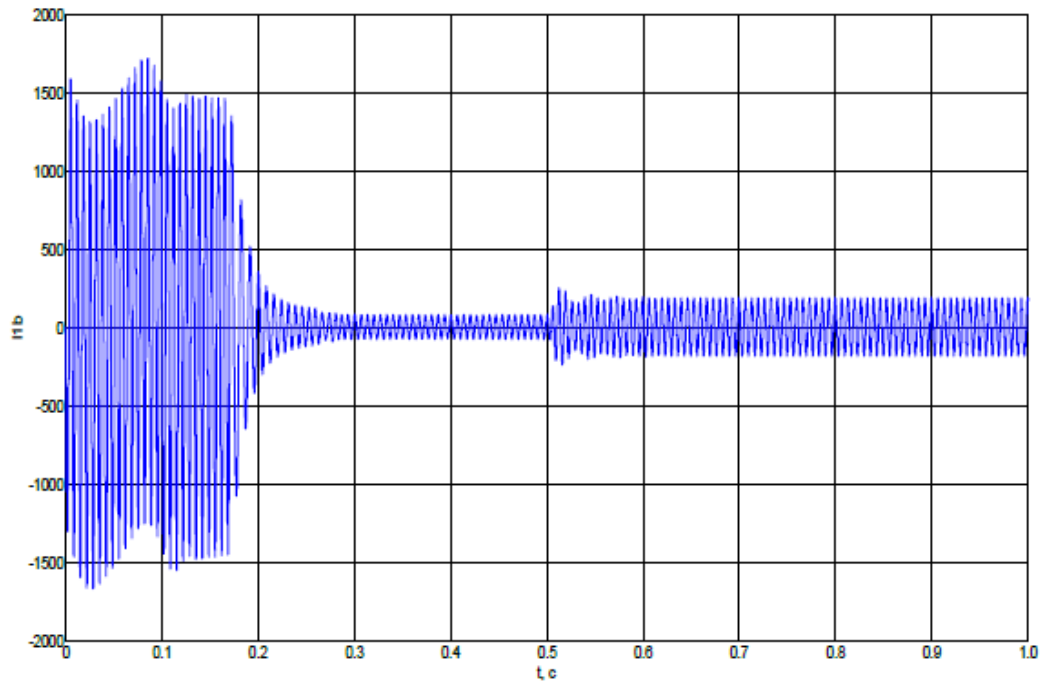


Рисунок 2.23 – Перехідний процес зміни струму фази I1b (реакція на стрибок сигналу завдання і накид навантаження)

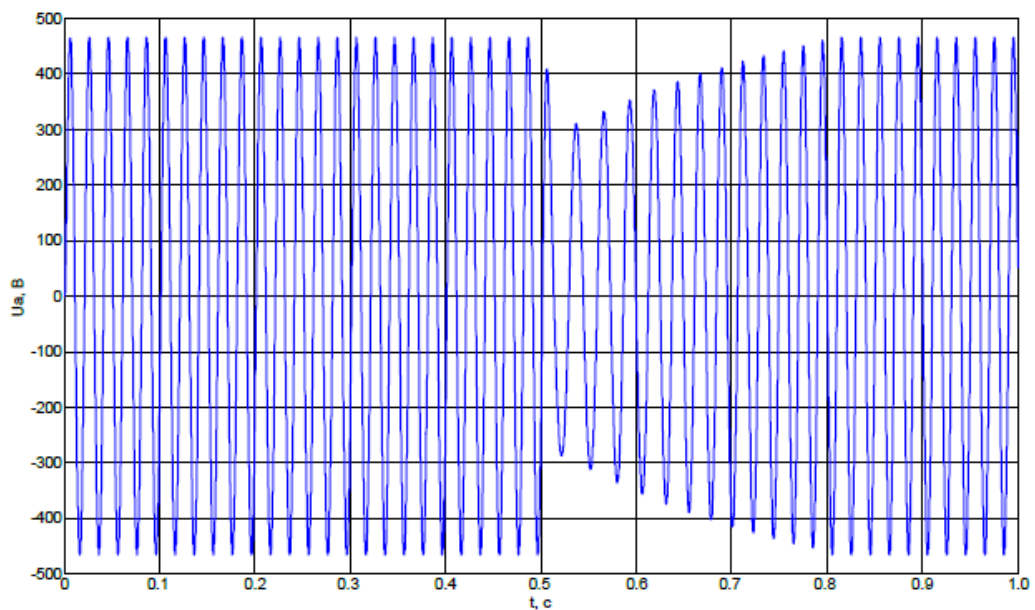


Рисунок 2.24 – Перехідний процес зміни напруги фази U1a (реакція на стрибок сигналу завдання і накид навантаження)

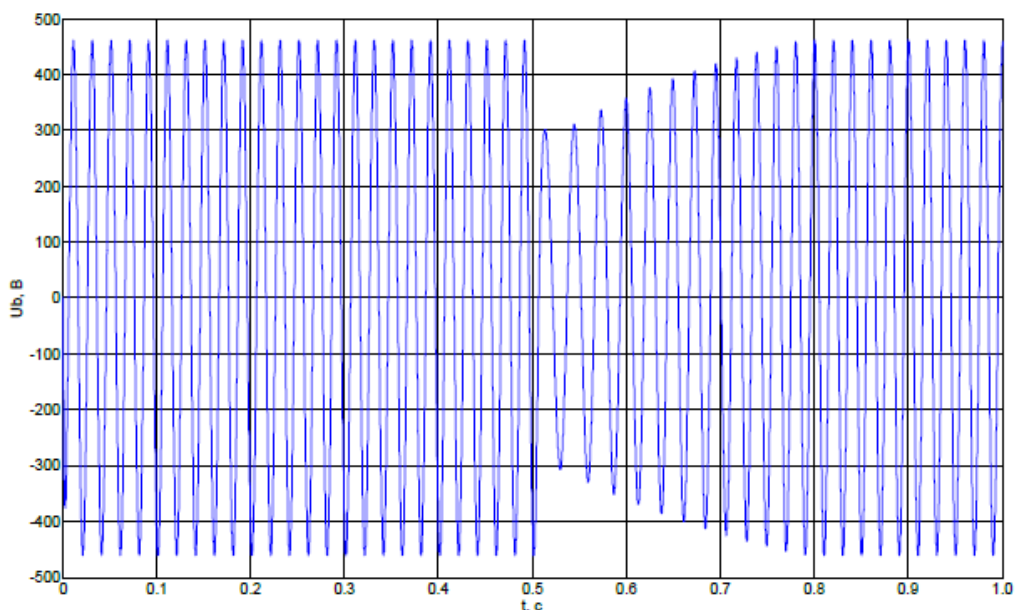


Рисунок 2.25 – Перехідний процес зміни напруги фази  $U_{1b}$  (реакція на стрибок сигналу завдання і накид навантаження)

Основні показники якості перехідних процесів у системі насосної установки включають визначення критичних моментів та оцінку швидкості реакції системи на зміни:

- Пуск двигуна на холостому ході при  $t=0$  - Цей момент є початковою точкою для аналізу роботи системи, де двигун запускається без застосування зовнішнього навантаження. Це дозволяє перевірити, як система реагує на сам пуск і які початкові параметри роботи двигуна.

- Накид навантаження при  $t=0,5$ с - Це важливий момент, що демонструє, як система відреагує на раптове збільшення навантаження. Здатність системи швидко і ефективно адаптуватися до змін у навантаженні є ключовим аспектом її надійності та ефективності.

- Час перехідного процесу:  $t=0,08$ с - Цей показник визначає, як швидко система стабілізується після внесених змін, таких як пуск двигуна або накид навантаження. Час перехідного процесу 0,08 секунди свідчить про високу швидкодію системи, що є показником ефективного управління і високої якості динамічних характеристик.

Ці показники допомагають оцінити, наскільки добре система може справлятися зі змінами у робочому навантаженні та якою мірою вона здатна підтримувати стабільність параметрів у різних умовах експлуатації.

Перерегулювання:

$$\sigma = \frac{H_{max} - H_{\infty}}{H_{\infty}} \times 100\% = \frac{69 - 65}{65} \times 100\% = 6.1\%$$

Динамічне падіння тиску при накиді навантаження:

$$\Delta H_{\omega\%} = \frac{\Delta H}{H_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{65 - 64}{65} \cdot 100\% = 1.5\%$$

Час відновлення тиску:  $t_{vt} = 0.7$  с

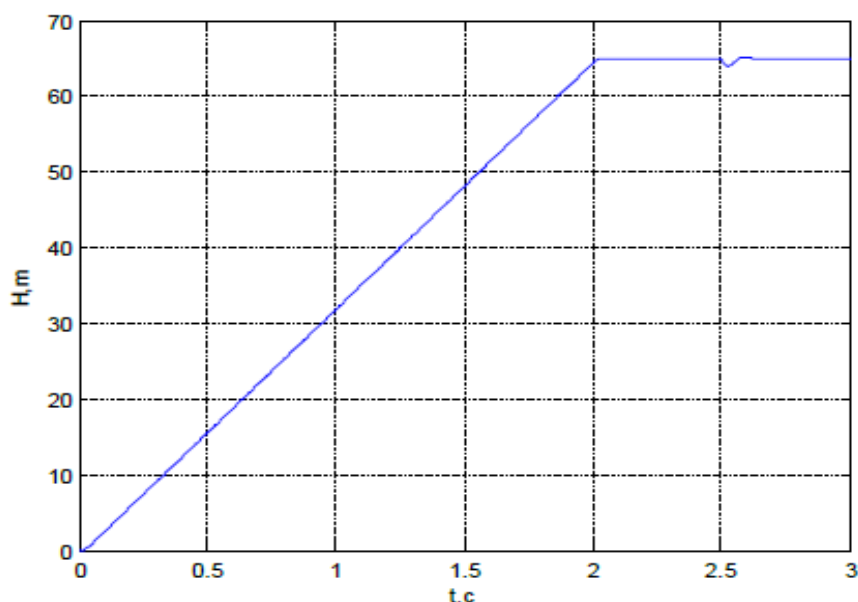


Рисунок 2.26 – Перехідний процес зміни тиску (реакція на плавне наростання сигналу завдання і накид навантаження)

## 2.5 Дослідження динамічних режимів роботи САК

Виконаємо дослідження режимів роботи САК стабілізації тиску в магістралі за допомогою середовища MATLAB.

Використовуючи Matlab побудуємо перехідний процес за сигналом завдання для даної системи (рис. 2.27):

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

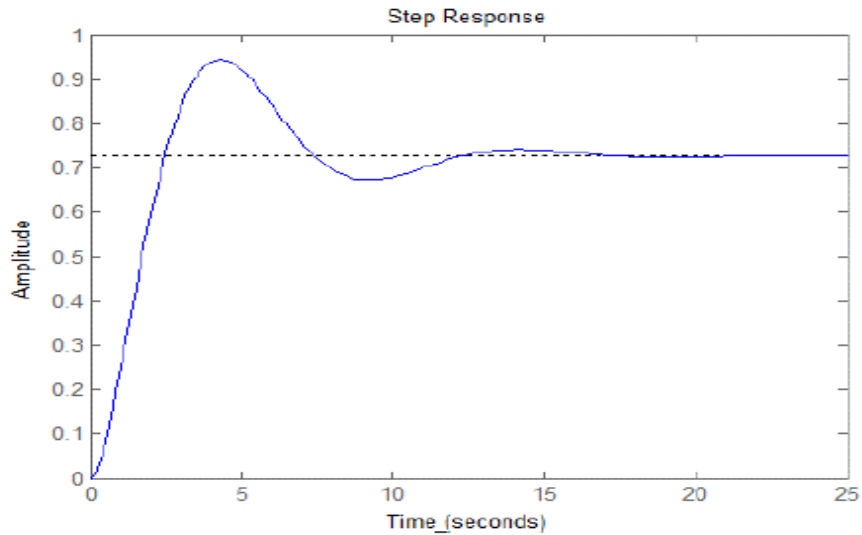


Рисунок 2.27 – Перехідний процес в Matlab

САК вважається стійкою, коли амплітудно-фазовий графік  $W_p(j\omega)$  розімкнутого контуру не огинає точку з координатами  $(-1, j0)$ .

Дослідження стійкості виконаємо за частотним критерієм Найквіста:

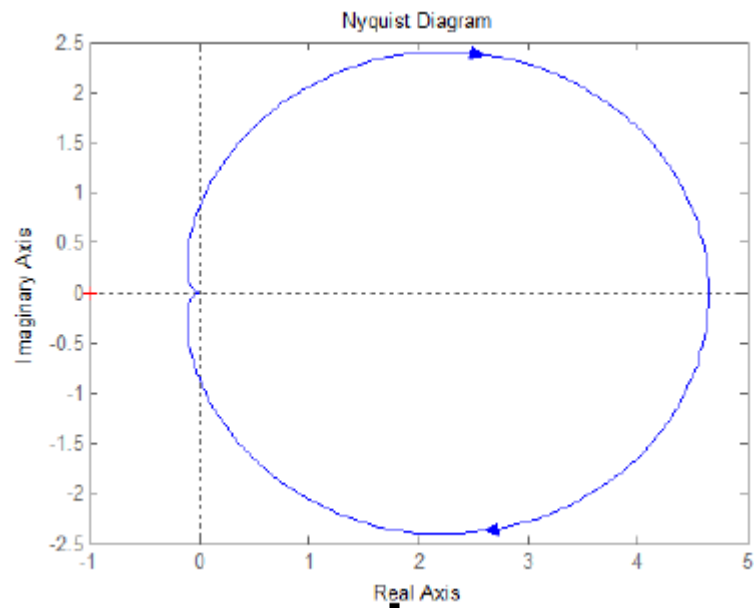


Рисунок 2.28 – АФХ розімкнутого контуру

Отже, за АФХ система є стійкою.

Побудова частотних характеристик замкнутої системи

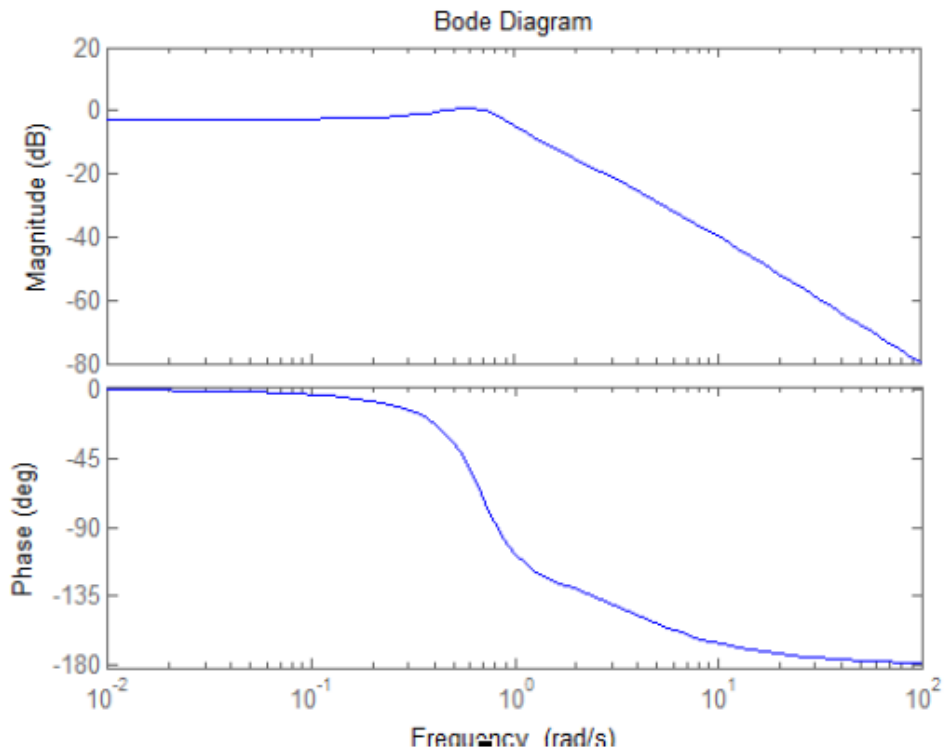


Рисунок 2.29 – ЛАЧХ та ЛФЧХ замкнутої системи

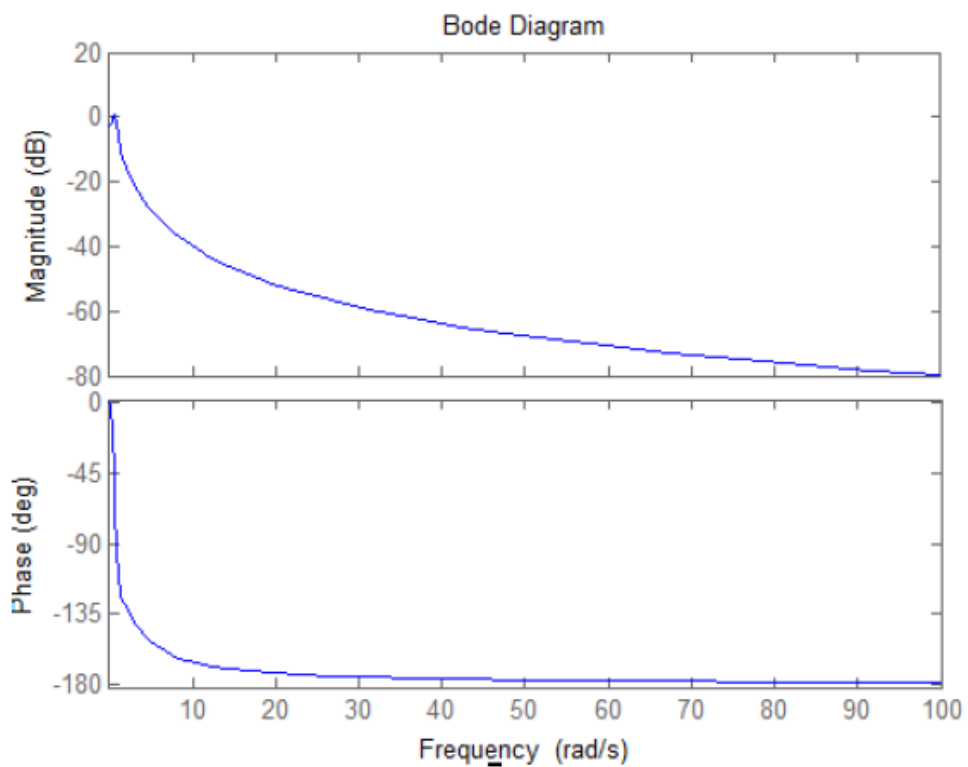


Рисунок 2.30 – АЧХ та ФЧХ замкнутої системи

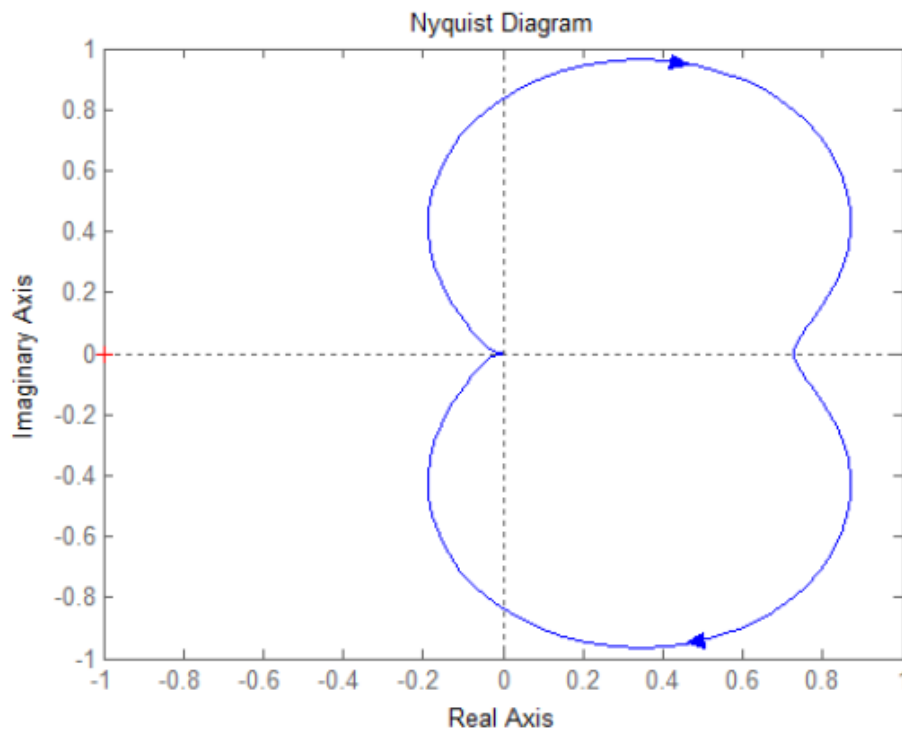


Рисунок 2.31 – АФХ замкнутого контуру

У реальних електроприводах напругу на виході регулятора, реалізованого як програмно, так і апаратно слід обмежити.

Графік зміни тиску, при реакції на вхідний скачок з урахуванням обмежень на виході регулятора тиску наведено на рис 2.32. Графік зміни тиску, який показує реакцію на плавне збільшення сигналу завдання з урахуванням обмежень виходу регулятора, представлений на рисунку 2.33.

Основні показники якості перехідних процесів

Перерегулювання:

$$\sigma = \frac{H_{max} - H_{\infty}}{H_{\infty}} \times 100\% = \frac{80 - 65}{65} \times 100\% = 23\%$$

Динамічне падіння напору при при накиді навантаження:

$$\Delta H_{\omega\%} = \frac{\Delta H}{H_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{65 - 64}{65} \cdot 100\% = 1.5\%$$

Час відновлення напору:  $t_{vt} = 0.8$  с

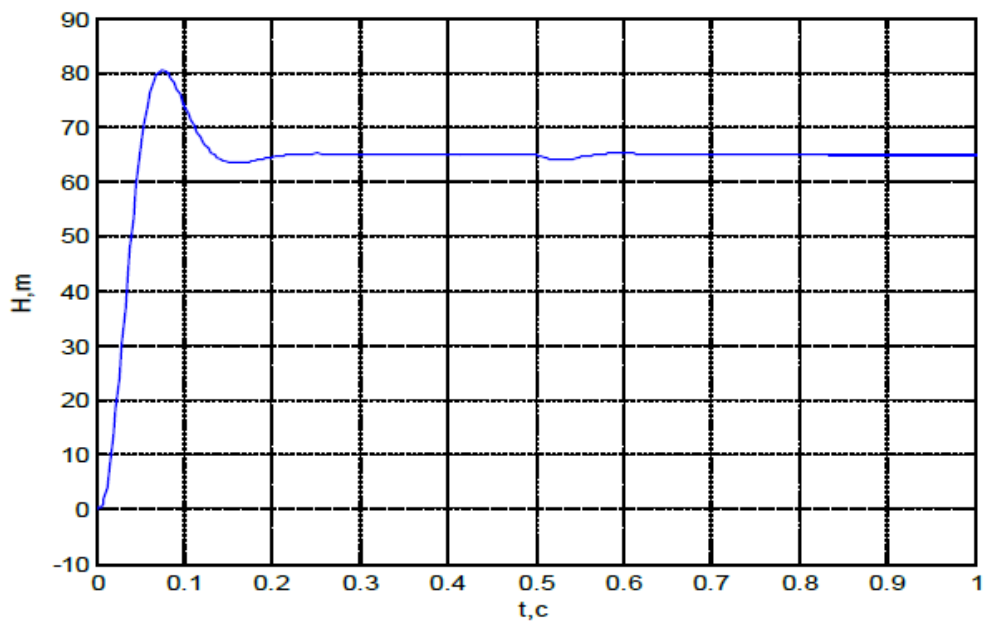


Рисунок 2.32 – Перехідний процес зміни тиску (реакція на скачок сигналу завдання й накиді навантаження)

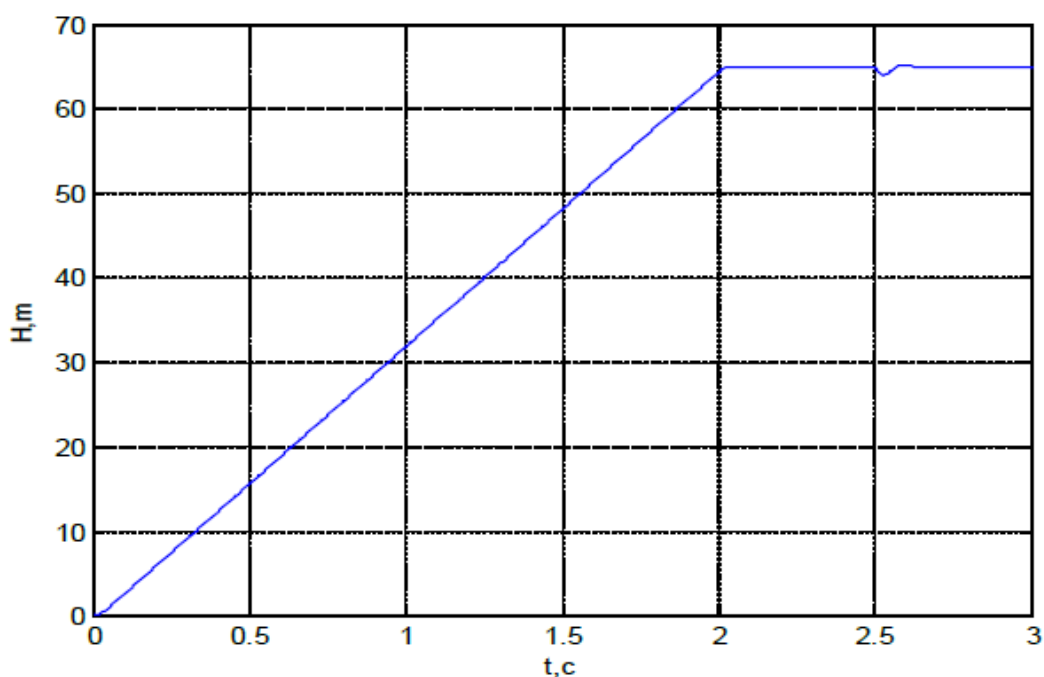


Рисунок 2.33 – Перехідний процес зміни тиску (реакція на скачок сигналу, на плавне наростання сигналу завдання й накиді навантаження)

З отриманих результатів моделювання можна зробити наступні висновки:



- Режим відпрацювання скачка завдання без обмеження регулятора дещо відрізняється від стандартного налаштування на модульний оптимум. Це пояснюється динамікою насосу, не врахованої при розрахунках регулятора.
- Навантаження відпрацьовується контуром без статичної помилки завдяки наявності інтегральної складової у регуляторі тиску.
- Встановлення обмежень на вихідний сигнал регулятора погіршує якість перехідних процесів: знижується швидкість реакції системи, і зростає перерегулювання. Використання задавача інтенсивності на вході системи дозволяє забезпечити плавний пуск насосної установки у встановлений час, при цьому зменшуючи ризик гідроудару та перерегулювання.

## 2.6 Розробка функціональної схеми автоматизації

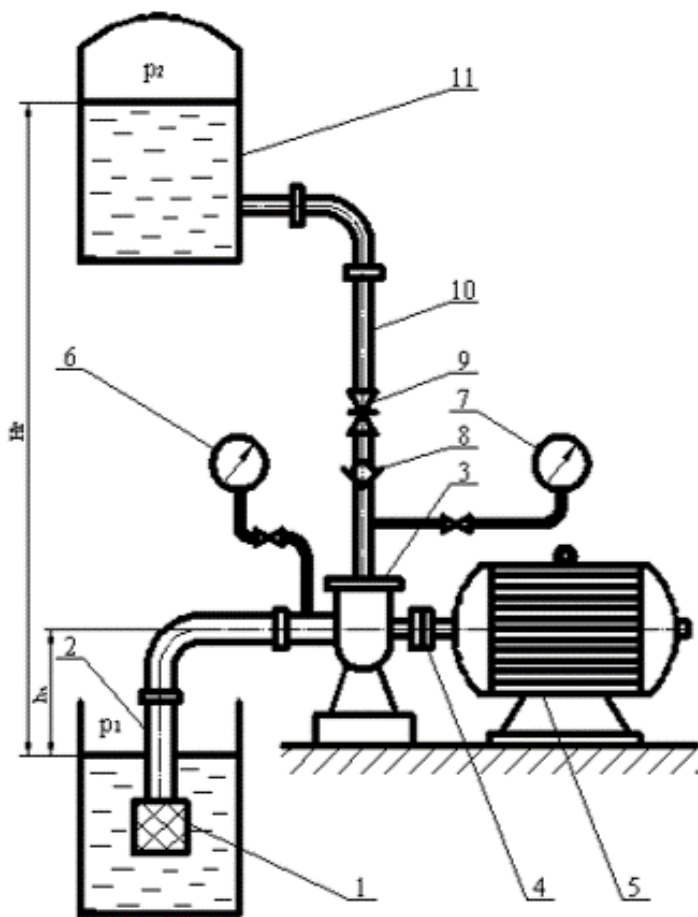
Насосна установка (рис.2.34) включає в себе насосний агрегат, трубопроводи, резервуари, вимірювальні прилади та арматуру. Насос втягує рідину з приймального резервуару та перекачує її через всмоктувальні та напірні трубопроводи до напірного резервуару. Вибір діаметрів трубопроводів та типу арматури залежить від призначення установки, її продуктивності та робочих умов.

Приймальний клапан з сіткою служить для утримання рідини у всмоктувальній трубі під час заповнення насоса перед його запуском. У випадку використання вакуум-насоса для заповнення, приймальний клапан не встановлюють.

Засувка на всмоктувальному трубопроводі потрібна, коли насос працює під тиском. Зворотний клапан перешкоджає зворотному потоку води після зупинки насоса, а також дозволяє тримати засувки резервного насоса відкритими для миттєвого запуску.

На напірному трубопроводі засувка використовується для регулювання потоку насоса, дозволяючи адаптувати його робочий режим до потреб.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		63



1 – приймальний клапан із сіткою; 2 – всмоктувальний трубопровід; 3 – насос; 4 – муфта; 5 – електродвигун; 6 – вакуумметр; 7 – манометр; 8 – зворотний клапан; 9 – засувка регулююча; 10 – напірний трубопровід; 11 – напірний резервуар;  $H_g$  – геометрична висота;  $h_v$  – висота всмоктування насоса;  $p_1$ ,  $p_2$  – абсолютні або надлишкові тиски на поверхні

Рисунок 2.34 – Схема насосної установки

Вакуумметр служить для вимірювання вакууму в всмоктувальному трубопроводі, тоді як манометр вимірює тиск у напірному трубопроводі. У деяких випадках насосна установка може також включати запобіжний клапан, витратомір та інші пристрої.

Зазвичай, насосна установка містить кілька систем: гідравлічну, електропостачальну, автоматизаційну та інші. Гідравлічна система включає в себе баки, трубопроводи, насоси та контрольно-вимірювальну та пускорегулювальну апаратуру, кожна з яких виконує певні функції в рамках загальної роботи установки.

Система енергопостачання насосної установки забезпечує електричний зв'язок з енергосистемою і гарантує неперервне забезпечення електроенергією

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

всіх споживачів насосної установки. Система автоматики виконує функції дистанційного управління насосною установкою та електропостачанням.

Стабілізація тиску в системі водопостачання залежить від конкретних цілей. Якщо метою є лише стабілізація тиску, задача стає простішою; якщо необхідна економічність — це вже інша справа; якщо ж потрібно досягти максимальної ефективності при мінімальних енерговитратах та обмежених капіталовкладеннях, особливо у фінансово складних умовах, — завдання ускладнюється. У випадку управління двома і більше насосами, варіанти систем управління значно розширюються.

Виходячи з аналізу потреб споживачів, які варіюються впродовж доби, та вартості обладнання, було вирішено встановити три насоси: один основний потужністю 7,5 кВт та два допоміжних по 11 кВт.

Структурна схема цієї системи показана на рис. 2.35. У цій схемі насос №1 регулюється за допомогою перетворювача частоти з ПД-регулюванням, що дозволяє точно підтримувати необхідний тиск у системі. Насоси №2 та №3 керуються за допомогою двопозиційного двоканального регулятора з релейним виходом і працюють за принципом включення-виключення, вступаючи в дію коли потрібно підтримати тиск при високому споживанні води.

Центральним елементом управління системи є давач тиску, що видає сигнал 4...20 мА. Цей сигнал подається на аналоговий вхід перетворювача частоти та вхід регулятора. Налаштування двоканального регулятора забезпечує, що вхідний сигнал передається одночасно на два внутрішніх компаратори, забезпечуючи адаптивне управління. Плавний пуск для насосів №2 і №3 використовується з метою збільшення їхнього ресурсу роботи та мінімізації гідроударів, що можуть негативно вплинути на систему водопостачання.

Робочий тиск у системі встановлено на рівні  $P_n = 4,0$  бар. З діаграми видно, що насос №1, який керується за допомогою ПЧ, працює в діапазоні 3,5 – 4,8 бар. Стабілізацію тиску в системі забезпечує внутрішній ПД-регулятор. У разі зниження тиску вихідна частота перетворювача частоти збільшується, і навпаки. Верхнє обмеження частоти становить 50 Гц, а нижнє – 10 Гц.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

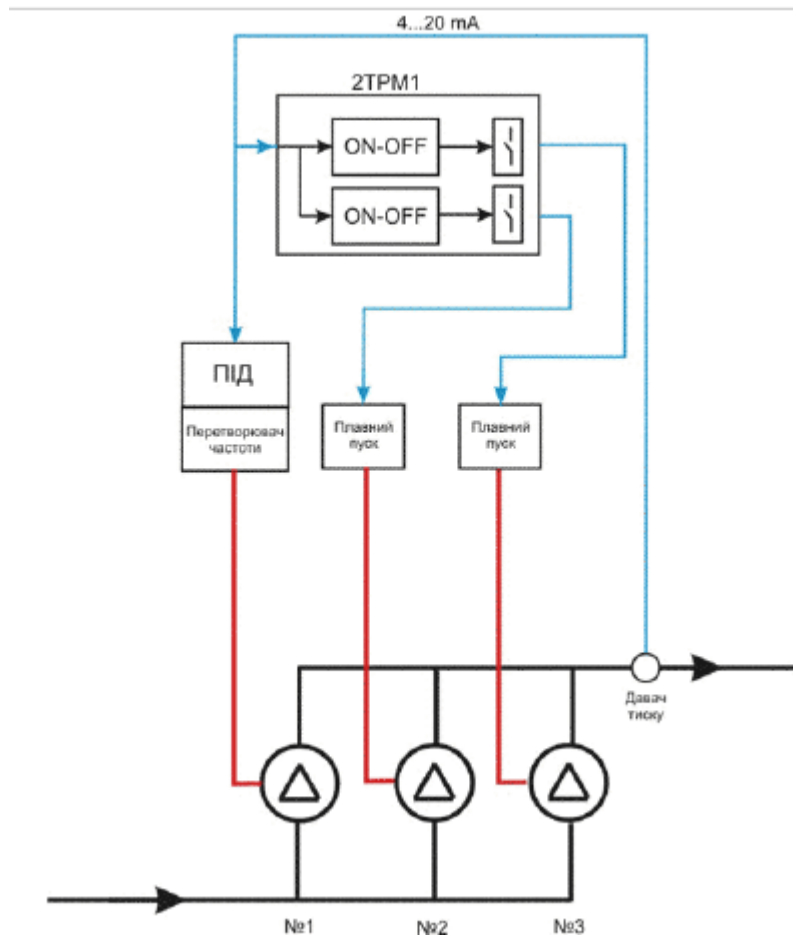


Рисунок 2.35 – Структурна схема

Якщо тиск знижується (при збільшенні витрати) до межі  $P_1 = 3,5$  бар, насос №1 працює на частоті 50 Гц, і спрацьовує перший компаратор, що запускає насос №2. Робота цього насоса дозволяє підняти тиск, при цьому вихідна частота перетворювача частоти насоса №1 починає зменшуватися до 35 Гц. У результаті, тиск у системі стабілізується на рівні 4,0 бар.

Основне призначення насосних підстанцій полягає у зміні тиску в подаючому або зворотному трубопроводі після підстанції, а також у збільшенні пропускної здатності мережі.

Автоматизація насосної станції на подаючій магістралі включає наступні заходи:

- Блокування роботи насосних агрегатів;
- Блокування роботи електродвигунів насосів та закриття засувки на нагнітальних патрубках;

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

- Автоматичний запуск запасного насоса у випадку зниження тиску в подаючому патрубку основного насоса;
- Автоматичне переключення на запасне джерело електроживлення;
- Система сигналізації для сповіщення про будь-які несправності насосної станції, такі як перегрів підшипників, автоматичний запуск запасного насоса, падіння тиску води після насосів тощо.

При автоматизації насосної станції на зворотній магістралі особлива увага приділяється підтриманню стабільного тиску в всмоктуючому колекторі, оскільки він має ключове значення для надійності роботи систем опалення. Також передбачений автоматичний захист від падіння тиску води в колекторі, що важливо не тільки під час звичайної експлуатації, але й у разі аварій. У кризових ситуаціях автомат розсічки ділить теплову мережу на дві гідравлічно незалежні зони: верхню, де тиск після спрацювання захисту залишається високим, та нижню, де тиск відповідно знижується.

Основною причиною значних і раптових падінь тиску води в всмоктуючому колекторі насосних станцій на зворотних трубопроводах зазвичай є зупинки роботи насосів на підстанціях або центральних насосних установках котелень. Такі зупинки можуть бути спричинені різними технічними несправностями, включно з відключенням електроживлення. Тому в системі захисту використовуються гідравлічні, а не електричні, регулятори тиску. Ці регулятори, а також прилади вимірювально-управляючого автомата розсічки, реагують на зміни тиску у всмоктуючому трубопроводі насосної станції.

## 2.7 Вибір технічного забезпечення і опис його характеристик

Автоматизована система керування повинна складатися з наступних рівнів (рис. 2.36):

- 1-й рівень - датчики вимірюваних параметрів, прилади, регулятори, виконавчими механізмами і пристрої;

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		67

– 2-й рівень – мікроконтролерні пристрої для автоматичного збору і первинної обробки результатів вимірювання;

– 3-й рівень системи (операторський) - робочі станції операторів, що забезпечують обробку і відображення інформації, реєстрацію, архівування, документування та ін.



Рисунок 2.36 – Функціональна схема рівнів системи керування стабілізації тиску в магістралі

Відповідно до вимог НПаОП, насосні станції будь-якого призначення повинні проектуватися, як правило, з управлінням без постійної присутності обслуговуючого персоналу. Управління може бути:

- Автоматичним, залежно від технологічних параметрів (рівень води в резервуарах, тиск або витрата води в мережі).
- Дистанційним (телемеханічним), здійснюваним з пункту управління.
- Місцевим, яке здійснюється періодично приходячим персоналом з передачею необхідних сигналів на пункт управління або на пункт із постійною присутністю обслуговуючого персоналу.

Верхній рівень системи забезпечує виконання функцій оперативно-

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

диспетчерського керування та дистанційного контролю параметрів технологічного процесу термічної обробки обкотишів. До складу підсистеми верхнього рівня входять робочі станції фахівців (головний диспетчер-технолог, головний інженер) з пристроями друку. Станції володіють можливістю взаємного дублювання і резервування та безперебійної роботи при провалах напруги живлення.

Завдання, які вирішуються системою верхнього рівня:

- автоматизована видача диспетчером команд керування і автоматичний контроль їх виконання;
- відображення на екранах робочих станцій оперативної інформації у вигляді екранних форм (мнемосхем), графічних залежностей контрольованих параметрів, журналу аварійних та інших подій тощо;
- парольний захист прав доступу до інформації. Також передбачена можливість:
  - одночасного виконання обчислювальних операцій і будь-яких інших дій, управління базами даних, формування звітів і завдань;
  - організації єдиного централізованого списку контрольованих параметрів з можливістю створення глобальних змінних, доступних всім клієнтським застосуванням програмного комплексу, що володіє механізмом резервування серверів OPC; і т. д.

Нижній рівень забезпечує виконання всіх алгоритмів ведення технологічного процесу, функцій захисту та аварійної сигналізації при відхиленні стану обладнання від норми, а також функцій зв'язку з верхнім рівнем АСК стабілізації тиску в магістралі. Цей рівень доцільно реалізувати на базі промислових логічних контролерів.

Для системи водопостачання з вищезгаданими вимогами необхідно обрати апаратну складову системи, що включає датчики витрати води, датчики тиску, пристрої керування клапанами, контролери та інші необхідні компоненти.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		69

Виходячи з тих високих вимог до якості та надійності роботи цієї системи, яку ми маємо, ми будемо обирати саме індустріальне обладнання зарекомендованих Європейських виробників задля забезпечення цих потреб.

PLC (Programmable Logic Controller):

– Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C(AC/DC/Relay) (рис. 2.37) [5]:  
для керування та регулювання підключеного до нього обладнання установки.  
Його загальна специфікація та схема з'єднань (рис. 2.38):



Рисунок 2.37 - Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C(AC/DC/Relay)

Таблиця 2.1 - Специфікація CPU SIMATIC S7-1200 1212C AC/DC/Relay.

Модель	CPU 1212C AC/DC/Relay
Номер	6ES7 212-1BD30-0XB0
Розмір ШxВxГ	90x100x75
Вага	425 грам
Розсіювання потужності	10 W
Наявний струм (SM і шина CM)	макс. 1000 mA (5 В DC)



Нааявний струм (24 В DC)	300 мА макс. (живлення датчиків)
Споживання струму цифровим входом (24 В DC)	4 мА/вход
Характеристика CPU	
Пам'ять	Робоча пам'ять 25 Кбайт / Завантажувальна пам'ять 1 Мбайт / Зберігається пам'ять 2 Кбайти
Вбудовані цифрові входи/виходи	8 входів/6 виходів
Вбудовані аналогові входи/виходи	2 входи
Об'єм оброблення даних	1024 байта вхід/1024 байта вихід
Бітова пам'ять (М)	4096 байт
Додаткові сигнальні модулі	Макс. 2 SM
Додаткові сигнальні плати	Макс. 1 SB
Додаткові комунікаційні модулі	Макс. 3 CM
Швидкісні лічильники	Всього 6 100/80 kHz (Ia.0 to Ia.5) 30 /20 kHz (Ia.6 to Ia.7)
Імпульсні виходи	2
Карта пам'яті	SIMATIC (Опціонально)
Тривалість зберігання пам'яті	Тип. 10 днів / 6 днів мін. При темп. 40 С
PROFINET	1 комунікаційний порт для зв'язку Ethernet
Швидкість виконання арифметичних операцій	18 мкс/команду
Швидкість виконання булевих операцій	0.1 мкс/команду

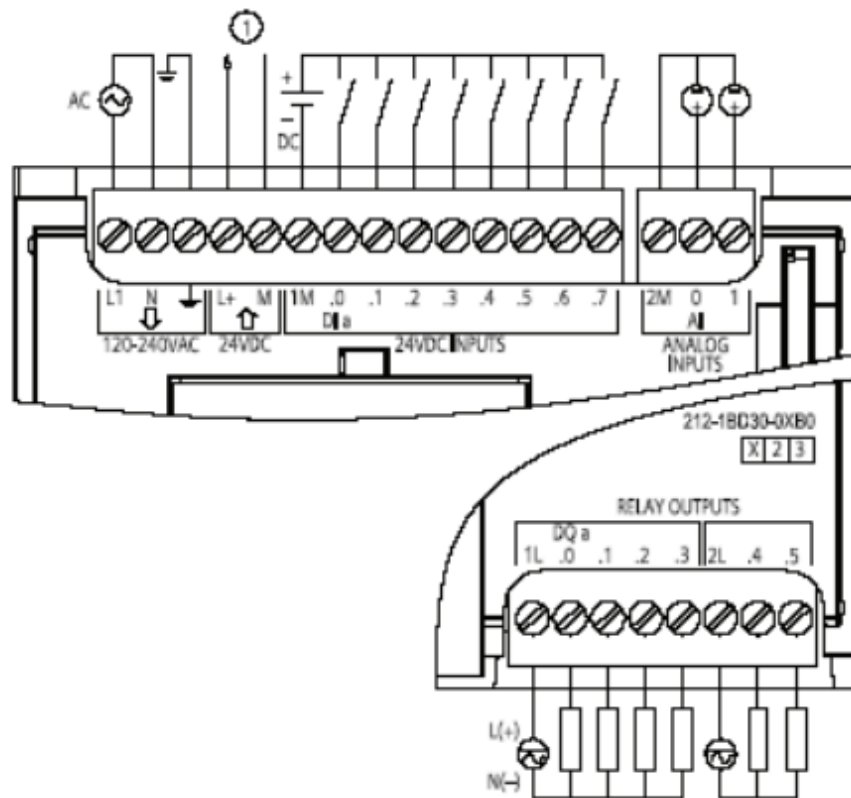


Рисунок 2.38 - CPU 1212C AC/DC/Relay

SCADA система (Supervisory Control and Data Acquisition): Siemens WinCC [6]: для моніторингу та керування всією системою.

Створення візуальних інтерфейсів: WinCC дозволяє створювати інтерактивні графічні інтерфейси для відображення стану та керування промисловими процесами.

Моніторинг та архівування даних: Програмне забезпечення забезпечує можливість збирання, моніторингу та архівування даних з різних джерел для подальшого аналізу та звітності.

Віддалений доступ: WinCC дозволяє віддалений доступ до системи НМІ через Інтернет або локальну мережу для моніторингу та керування промисловими процесами з віддалених місць.

Системи оповіщення та тривоги: Програмне забезпечення може відслідковувати статус промислових процесів і генерувати тривоги в разі виникнення проблем або відхилень від заданих параметрів.

Інтеграція з ПЛК та іншими промисловими пристроями: WinCC може легко інтегруватися з контролерами програмованої логіки та іншими промисловими пристроями для обміну даними та керування процесами.

На диспетчерських автоматизованих робочих місцях (АРМ) повинна відображатися вся інформація про насосну станцію, свердловини та інші об'єкти системи водопостачання, включаючи стан технологічного та електрообладнання. Диспетчерські АРМ забезпечують дистанційне керування обладнанням відповідно до заданих та прописаних у ПЛК алгоритмів, виконують розрахунок продуктивності станції, виводять і друкують звіти, а також дозволяють перегляд історії подій та тривожних повідомлень.

Датчики витрати води:

- Siemens SITRANS FM MAG 8000 (рис. 2.39) [7]: для точного виміру витрати води в різних ділянках мікрорайону.



Рисунок 3.39 - SITRANS FM MAG 8000

Клапани керування водою:

- Siemens SITRANS FM MAG 8000: для регулювання потоку води.

Датчики витоків:

- Siemens SITRANS FM MAG 8000: для швидкого виявлення та локалізації витоків.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Загалом Siemens SITRANS FM MAG 8000 - це досить універсальна модель, яка має широкий функціонал, що перекриває суттєву частину вимог до цієї системи водопостачання. Технічні характеристики наведені в табл.2.2.

Таблиця 2.2 - Специфікація Siemens SITRANS FM MAG 8000.

Номинальний розмір	Від DN 25 до DN 1200 (від 1” до 48”) Від DN 50 до DN 300 (від 2” до 12”) (SITRANS FM MAG 8000 CT)
Точність	0.2% ± 2мм/с и 0.4% ± 2мм/с
Входи / Виходи	2 пасивних виходи
Комунікація	IrDA: Стандартний вбудований інфрачервоний інтерфейс зв'язку з протоколом MODBUS RTU
Живлення	Внутрішній або зовнішній акумулятор 12-24 V AC/DC і 115-230 V AC
Робочий тиск	Макс. 40 бар (макс. 580 psi)
Навколишня температура	Від -20 до 60 °C (від -4 до 140 °F)
Футерування	EPDM
Електроди	Hastelloy C 276
Корпус	IP68 (NEMA 6P)
Матеріал	Перетворювач: верхня частина - нержавіюча сталь (AISI 316), нижня частина – латунь з покриттям. Датчик: вуглецева сталь

Датчики тиску:

Перетворювач SITRANS P DS III(рис. 2.40) [8]: Він включає цифрові датчики тиску для його вимірювання в системі водопостачання.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74



Рисунок 2.40 - SITRANS P DS III

Ця модель включає датчики для вимірювання диференціального тиску, абсолютного тиску, надлишкового тиску, витрати та рівня. Вона має такі загальні технічні характеристики:

Таблиця 2.3 - Специфікація SITRANS P DS III

Точність	$\leq 0.065\%$
Довготривала стабільність	$\leq 0.125\%$ за 60 місяців
Діапазон вимірювання	від 0-1 мбар до 0-700 бар
Сертифікати	ATEX EEx ia, EEx ib, захист від вибухонебезпечного пилу, FM, CS
Рівень повноти безпеки (SIL)	для використання в додатках SIL2 / 3 згідно IEC 61511
Комунікація	HART, PROFIBUS PA, PROFIsafe або FF

Мережеве обладнання:

- КЕВ С6 Router L4(рис. 2.41) [9], Ethernet кабель.



Рисунок 2.41 - KEB C6 Router

KEB C6 Router L4 - це промисловий маршрутизатор, розроблений компанією KEB Automation, який використовується для забезпечення зв'язку та передачі даних у промислових середовищах.

Таблиця 2.4 - Специфікація KEB C6 Router L4

Процесор	ARM Cortex A8 processor Freescale® i.MX535 1 GHz
Оперативна пам'ять	1 Gb
NAND-Flash	256 MB
SSD	2 Gb
Блок живлення	9 V DC
Середовище використання	0 ... 50 °C (-20 ... 70 °C), вологість до 95 % (без конденсації)
Ethernet	WAN 1 x 10/100 Mbps (RJ45) LAN 1 x 100 Mbps (RJ45)
USB	1 x USB 2.0
Serial interface	1 x RS232/422/485 (DB15M) / MPI 187. kbit/s
Тип мережі	4G LTE Pentaband Modem до 50 Mbps upload/100 Mbps download
Шина	FDD-LTE: B1/B2/B3/B4/B5/B7/B8/B17/B20; TDD-LTE: B38/B40; UMTS/HSPA+: B1/B2/B5/B8; GSM/GPRS/EDGE: 900/1800 MHz
Антенa	1 x SMA Plug
SIM	1 x SIM Card (mini)

					<i>KHY KPB.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок живлення та електрощити:

- Блок живлення SIEMENS SITOP Modular 6EP1333-3BA00 (рис. 2.42) [10] та електрощит WALL-MOUNTED ENCLOSURE 2 ROWS PRISMA PACK 160 IP30(рис. 2.43) [11].



Рисунок 2.42 - SIEMENS SITOP Modular 6EP1333-3BA00

SIEMENS SITOP Modular 6EP1333-3BA00 - це блок живлення з високою надійністю та ефективністю, призначений для живлення автоматичних систем, промислових установок та електричного обладнання. Його основні технічні характеристики наведені у табл.2.5.

Таблиця 2.5 - Специфікація SIEMENS SITOP Modular 6EP1333-3BA00.

Вхідна напруга	120/230 В АС
120/230 В перемінного струму	24 В DC
Максимальний вихідний струм	5 А
Номінальна потужність	120 ВА
Робоча температура	-25°C до +70°C
Коефіцієнт потужності	більше 0,85
Захист	Від короткого замикання та перевантаження
DIN-рейка	Так



Рисунок 2.43 - WALL-MOUNTED ENCLOSURE 2 ROWS PRISMA  
PACK 160 IP30

Характеристики електрощита PRISMA PACK 160 IP30 наведені у табл.  
2.6.

Таблиця 2.6 - Специфікація 2 ROWS PRISMA PACK 160 IP30.

Розмір Ш x В x Г (mm)	555 x 480 x 157
Тип	Модульний (Закритий)
Горизонтальні ряди	2
Кількість вертикальних модулів (50mm)	6
Стандарти	IEC 61439-1 IEC 61439-2 IEC 62208 IEC 61439-3
Вага (kg)	8,56



Створена система потребуватиме мінімального, але постійного обслуговування та моніторингу в процесі її життєдіяльності та майбутньої роботи.

Усі обрані елементи апаратної складової розробленої системи обиралися з думкою про можливі плани подальшого розвитку та удосконалення системи, що включають розширення функціональності, підвищення стійкості та надійності, а також забезпечення сумісності з сучасними та майбутніми елементами на заміну поточних у разі їх несправності.

*Висновки до розділу:*

В даному розділі був наведений математичний опис технологічного процесу стабілізації тиску в магістралі, приведені формули та рівняння для розрахунків параметрами трубопроводу та інших параметрів необхідних для технологічного процесу.

Було виконано синтез САК стабілізації тиску в магістралі. Розроблені структурна схема стабілізації тиску в магістралі та функціональна схема автоматизації підкачуючої насосної станції.

Для моделювання системи управління насосної установки було використано додаток SIMULINK пакета прикладного програмного забезпечення MATLAB Було виконано синтез контуру стабілізації напору в точці водогону, побудовано структурну схему та розраховано перехідний процес.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

## ВИСНОВКИ

В першому розділі наведено опис технологічного процесу та об'єкту автоматизації насосної станції підкачки води, структури відцентрового насосу, розглянуто типи існуючих насосних станцій. Виконано аналіз методів керування та існуючих систем автоматичного керування, з якого можна зробити висновок, що на даний час існує достатня кількість різноманітних систем автоматичного керування, які задовольняють вимоги, сформовані в кінці розділу.

У другому розділі було розроблено функціональну та структурну схеми САК стабілізацією тиску в магістралі. Також розроблено структурну схему АСК стабілізації тиску в магістралі, яка поділена на три рівні.

В даному розділі був наведений математичний опис технологічного процесу стабілізації тиску в магістралі, були приведені формули та рівняння для розрахунків параметрами трубопроводу та інших параметрів необхідних для технологічного процесу. Для реалізації АСК стабілізації тиску в магістралі було використане технічне забезпечення, яке відповідає вимогам контролю та керування АСК стабілізації тиску в магістралі.

Було обрано все технічне забезпечення на базі рішень Siemens, а саме датчики, необхідні пристрої для вимірювання технологічних параметрів та в якості ПЛК було обрано Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C

Було виконано синтез САК стабілізації тиску в магістралі. Були розроблені структурна схема стабілізації тиску в магістралі. Наведений опис передавальних функцій систем та використовуючи середовище MatLab та пакет Simulink були побудовані моделі систем керування, в якості регулятора було використано ПІД-регулятор та розраховано його параметри за допомогою компонента PID Tuner.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Романенко В.І.</i>			<i>ВИСНОВКИі</i>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О.І.</i>					60	2
						<i>КНУ АКІТ-20</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Тронь В.В.</i>						

Було розроблено функціональну схему автоматизації підкачуючої насосної станції та проведено дослідження динамічних режимів роботи САК за допомогою середовища MATLAB. У рамках дослідження побудовано часові та частотні характеристики, а також визначено основні показники якості САК.

Було виконано синтез контуру стабілізації напору в точці водогону, побудовано структурну схему та розраховано перехідний процес.

Таким чином, мета бакалаврської роботи розкрита в повному обсязі, всі поставлені задачі виконані.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		81

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лобачев П. В. Насосы и насосные станции. М.:Стройиздат,1990.
2. Попкович Г. С., Гордеев М. А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения. М.: Высш. Шк, 1986
3. Возможности использования современного регулируемого электропривода в системах водоснабжения. URL: [www.privod.ru](http://www.privod.ru) (дата звернення 17.04.2024)
4. Дмитриенко Ю. А. Регулируемый электропривод насосных агрегатов. Кишинев, Штиинца, 1985.
5. Москаленко В. В. Электрический привод: Учебн. для электротехн. спец. техн. М., Высш. шк., 1991. 430 с.
6. Асинхронные электродвигатели. URL: [www.privod.ru/engines](http://www.privod.ru/engines)(дата звернення 05.05.2024)
7. Автоматизация насосных станций на основе частотных электроприводов URL: [www.rts.ua](http://www.rts.ua)(дата звернення 21.04.2024)
8. Логические контроллеры Modicon M241 и M251. Каталог, 2015
9. Гриценко К.Г. Автоматизоване енергозберігаюче управління насосною станцією системи водопостачання: автореф. дис. на здобуття ступеню канд. техн. наук: 05.13.07. Донецьк, 2002.
10. Вишневский К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. М.: Агропромиздат, 1986. 135 с.
11. Коренькова Т.В., Курбанова И.Г. Рациональные системы электропривода групповых насосных установок / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. Наук. пр. КДПУ. Вип. 2(19). Кременчук: КДПУ, 2003, 30-35с.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Романенко В.І.						
Перевір.		Савицький О.І.					62	3
Н. Контр.		Маринич І.А.				<i>КНУ АКІТ-20</i>		
Затвердив		Тронь В.В.						

12. Попович М.Г., Кострицький В.В. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія і практика): Навчальний посібник. К.: КНУТД, 2008. 408с.

13. Денисенко В. В. ПИД - регулятори: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. с. 66 - 74; 2007.

14. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. - IFAC Professional Brief, URL: <http://www.ifac-control.org>. (дата звернення 13.05.2024)

15. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів спеціальності 151–“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” Кривий Ріг, Видавничий центр ДВНЗ «КНУ». 2017, 50 с.

16. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с.(Інформація та документація).

17. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с.(Інформація та документація).

18. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с.(Інформація та документація).

19. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).

20. SIEMENS SIMATIC S7-1200 Programmable controller System Manual. URL:[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att\\_106119/v1/s71200\\_system\\_manual\\_en-US\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf)(дата звернення: 01.05.2024).

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

21. Siemens WinCC Configuration Manual Volume 1. URL: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/270/1145270/att\\_36311/v1/Confm1\\_e.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/270/1145270/att_36311/v1/Confm1_e.pdf)(дата звернення: 01.05.2024).

22. SIEMENS SITRANS F Electromagnetic flowmeters SITRANS MAG 8000 Operating Instructions. URL: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/781/109769781/att\\_993156/v1/A5E03071515-AFen\\_MAG\\_8000\\_OI\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/781/109769781/att_993156/v1/A5E03071515-AFen_MAG_8000_OI_en-US.pdf)(дата звернення: 01.05.2024).

23. SIEMENS SITRANS Pressure transmitter SITRANS P DS III with HART. URL:[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/649/81254649/att\\_99492/v1/A5E00047092-09en\\_DS3\\_HART\\_Ex\\_OI\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/649/81254649/att_99492/v1/A5E00047092-09en_DS3_HART_Ex_OI_en-US.pdf)(дата звернення: 01.05.2024).

24. INSTRUCTION FOR USE | C6 ROUTER. URL: [https://data.keb.de//securedl/sdl-eyJ0eXAI0iJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9/ma\\_ca\\_c6-router-20090747\\_en.pdf](https://data.keb.de//securedl/sdl-eyJ0eXAI0iJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9/ma_ca_c6-router-20090747_en.pdf)(дата звернення: 01.05.2024).

25. SIEMENS SITOP power supply SITOP modular 1ph/2ph. URL: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/578/81287578/att\\_21914/v1/modular\\_1-2ph\\_Handbuch\\_englisch\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/578/81287578/att_21914/v1/modular_1-2ph_Handbuch_englisch_en-US.pdf)(дата звернення: 01.05.2024).

26. Герасимов Г.Г. Проектування автоматизованих насосних станцій підкачки: Навчальний посібник – довідник. – Рівне: НУВГП, 2007.- 552 с.

27. Оглобля О.І. ДБН В.2.5-74:2013 "Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування". Проектно-вишукувальний інститут "УкрНДІводоканалпроект", 2013. 172 с. (Інформація та документація).

28. АКУТЕК Україна. Каталог проектів. Реалізовані проекти. URL: <https://aqteck.com.ua/ua/projects>(дата звернення: 01.05.2024).

29. Кравченко В. С. Водопостачання та каналізація: Підручник. "Кондор", 2003. 288 с.

30. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води: Підручник. К.: Вища шк., 2005. 671 с.

					<i>КНУ КРБ.151.24.07.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

