

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:

***«Автоматизація насосної станції зі стабілізацією тиску в
системі водопостачання»***

Виконав студент гр. АКІТ-22	_____ Кундіус Д. Ю.
Керівник	_____ Тиханський М. П.
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.

« _ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22 Кундіусу Дмитру Юрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація насосної станції зі стабілізацією тиску в системі водопостачання»

затверджено наказом по університету № 171с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 71с., презентація у Microsoft PowerPoint (13 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Тиханський М. П.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>18.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Тиханський М. П./

7. Запевнення: Я, Кундіус Дмитро Юрійович, 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 _____ / Кундіус Д. Ю./

АНОТАЦІЯ

Кундіус Д. Ю. Автоматизація насосної станції зі стабілізацією тиску в системі водопостачання: кваліфікаційна робота бакалавра: 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 71 с.

Об'єктом дослідження є автоматизована насосна станція системи водопостачання, призначена для подачі води споживачам із підтриманням стабільного тиску в мережі. Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби керування насосними агрегатами для стабілізації тиску.

Метою роботи є розробка проєкту автоматизації насосної станції зі стабілізацією тиску в системі водопостачання на основі сучасних засобів вимірювання, керування та регулювання.

У першому розділі розглянуто насосну станцію як об'єкт автоматизації, її призначення, основні елементи та принцип роботи. Визначено вимоги до системи керування, зокрема підтримання заданого тиску, енергоефективність і захист обладнання від аварійних режимів.

У другому розділі проведено розробку технічних рішень щодо автоматизації насосної станції. Обґрунтовано використання програмованого логічного контролера, частотного перетворювача та датчика тиску для реалізації автоматичного керування насосними агрегатами.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, НАСОСНА СТАНЦІЯ,
СТАБІЛІЗАЦІЯ ТИСКУ, СИСТЕМА ВОДОПОСТАЧАННЯ, ПЛК,
ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ДАТЧИК ТИСКУ

					КНУ КРБ.151.26.07.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Кундіус Д. Ю.								
Перевір.		Тиханський М.П.							4	1
								КНУ АКІТ-22		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ	9
ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	9
1.1 Характеристика об'єкту автоматизації	9
1.2 Опис системи автоматизації насосної станції	12
1.3 Аналіз існуючих рішень	17
1.4 Експлуатаційні вимоги до системи	20
1.5 Постановка завдань дослідження	23
РОЗДІЛ 2	27
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖУВАНОЇ СИСТЕМИ ТА	
ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ	27
2.1 Аналіз технологічних параметрів насосної станції	27
2.2 Розрахунок продуктивності насосного обладнання	29
2.3 Розрахунок напору та робочого тиску насосної станції	33
2.4 Визначення витрати води у системі технічного водопостачання	36
2.5 Гідравлічний розрахунок трубопровідної мережі	39
2.6 Побудова математичної моделі насосної станції	41
2.7 Моделювання системи автоматичного керування	45
2.7.1 Мета моделювання та постановка задачі	45
2.7.2 Структурна модель системи автоматичного керування	46
2.7.3 Опис математичної моделі та алгоритму роботи системи	
автоматичного керування	49
2.7.4 Дослідження впливу збурюючих впливів на систему	51

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ЗМІСТ</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Кундіус Д. Ю.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Тиханський М.П.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-22</i>		
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						5	1

2.7.5 Аналіз перехідного процесу САК	53
2.7.6 Частотний аналіз системи автоматичного керування	55
2.7.7 Реалізація алгоритму автоматичного керування у середовищі TIA Portal V13.....	58
2.7.8 Візуалізація технологічного процесу.....	63
2.7.9 Порівняння результатів MATLAB Simulink та TIA Portal	64
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71

					КНУ КРБ.151.26.07.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Сучасні системи водопостачання є важливою складовою інженерної інфраструктури промислових підприємств, житлових районів та об'єктів комунального господарства. Їх ефективна робота безпосередньо впливає на безперервність технологічних процесів, якість забезпечення споживачів водою, надійність обладнання та рівень енергоспоживання. Одним із ключових елементів таких систем є насосні станції, які забезпечують подачу води, підтримання необхідного тиску в трубопровідній мережі та стабільність роботи всієї системи водопостачання.

У процесі експлуатації насосних станцій часто виникають проблеми, пов'язані зі зміною витрати води, коливаннями тиску, нерівномірним навантаженням на насосні агрегати, підвищенням споживання електроенергії та зношуванням обладнання. Традиційні способи керування насосами не завжди дозволяють забезпечити необхідну точність регулювання та оперативне реагування на зміну технологічних параметрів. Тому актуальним завданням є впровадження автоматизованих систем керування, які забезпечують стабілізацію тиску, захист обладнання та підвищення енергоефективності роботи насосної станції.

Автоматизація насосної станції передбачає використання сучасних технічних засобів, зокрема датчиків тиску, витрати та рівня, програмованих логічних контролерів, частотних перетворювачів, виконавчих механізмів і засобів візуалізації технологічного процесу. Завдяки цьому забезпечується автоматичне регулювання продуктивності насосів відповідно до фактичного споживання води, підтримання заданого тиску в системі, контроль аварійних режимів та можливість оперативного керування обладнанням.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка проєкту автоматизації насосної станції зі стабілізацією тиску в системі водопостачання.

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.00.ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати насосну станцію як об'єкт автоматизації;
- розглянути особливості технологічного процесу подачі води;
- визначити основні вимоги до системи автоматичного керування;
- обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації;
- розробити структуру автоматизованої системи керування насосною станцією;
- описати алгоритм стабілізації тиску в системі водопостачання;
- передбачити захист насосного обладнання від аварійних режимів.

Об'єктом дослідження є насосна станція системи водопостачання, що забезпечує подачу води споживачам із підтриманням необхідного тиску в трубопровідній мережі.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого керування насосними агрегатами для стабілізації тиску в системі водопостачання.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування запропонованих технічних рішень для підвищення надійності, енергоефективності та безпеки роботи насосної станції. Впровадження автоматизованої системи керування дозволяє зменшити вплив людського фактора, забезпечити стабільні параметри водопостачання та продовжити строк служби насосного обладнання.

Таким чином, розробка проєкту автоматизації насосної станції зі стабілізацією тиску є актуальним завданням, спрямованим на покращення роботи систем водопостачання, зниження енергетичних витрат і підвищення ефективності експлуатації технологічного обладнання.

					КНУ КРБ.151.26.07.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Характеристика об'єкту автоматизації

Об'єктом автоматизації у даній кваліфікаційній роботі є насосна станція системи водопостачання, призначена для подачі води споживачам із підтриманням стабільного тиску в трубопровідній мережі. Основним завданням роботи такої станції є забезпечення необхідного напору та витрати води незалежно від змін водоспоживання протягом доби.

Насосні станції широко застосовуються у системах господарсько-питного, технічного та виробничого водопостачання. На рисунку 1.1 приклад насосної станції саме виробничого водопостачання.



Рисунок 1.1 – Виробнича насосна станція

Вони забезпечують транспортування води від джерела або резервуара до споживачів, створюючи необхідний тиск у напірному трубопроводі. Для нормальної роботи системи водопостачання важливо, щоб тиск підтримувався

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

у встановлених межах. Недостатній тиск може призвести до порушення подачі води, а надлишковий — до перевантаження трубопроводів, арматури та насосного обладнання.

Особливістю насосної станції як об'єкта автоматизації є змінний характер навантаження. Витрата води в системі залежить від кількості споживачів, режиму їх роботи, часу доби та технологічних потреб. При збільшенні водоспоживання тиск у мережі знижується, а при зменшенні витрати — підвищується. Тому для забезпечення стабільної роботи системи необхідно автоматично змінювати продуктивність насосного обладнання [13].

До складу насосної станції входять насосні агрегати, електродвигуни, трубопроводи всмоктувальної та напірної ліній, запірно-регулююча арматура, датчики технологічних параметрів, перетворювачі частоти, шафа керування та засоби візуалізації. Основним регульованим параметром є тиск у напірному трубопроводі. Його значення вимірюється датчиком тиску, сигнал з якого надходить до системи керування.

У сучасних системах автоматизації насосних станцій для стабілізації тиску доцільно використовувати частотно-регульований електропривод. Перетворювач частоти дозволяє плавно змінювати швидкість обертання електродвигуна насоса, а отже — змінювати подачу води відповідно до поточної потреби системи. Це забезпечує більш точне регулювання тиску, зменшує кількість пусків і зупинок насосів, знижує механічне навантаження на обладнання та сприяє економії електроенергії [26].

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

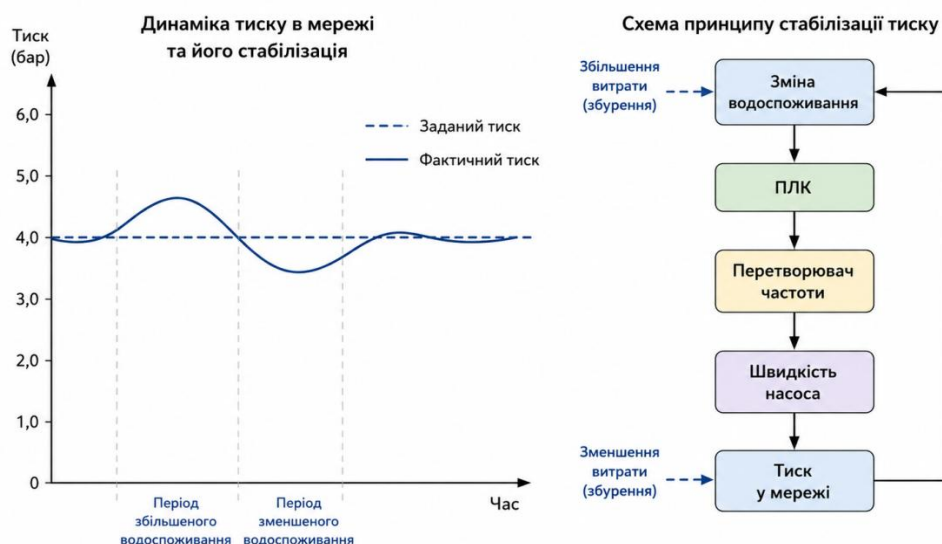


Рисунок 1.2 – Принцип стабілізації тиску в системі водопостачання

Принцип роботи автоматизованої насосної станції полягає в постійному контролі тиску в напірній магістралі. Поточне значення тиску порівнюється із заданим значенням, яке встановлюється оператором або задається технологічним регламентом. Якщо тиск зменшується нижче заданого рівня, система керування збільшує частоту обертання електродвигуна насоса або вмикає додатковий насос. Якщо тиск перевищує задане значення, продуктивність насоса зменшується або частина агрегатів вимикається [25].

Для реалізації автоматичного керування доцільно застосовувати програмований логічний контролер. Він обробляє сигнали від датчиків, виконує алгоритм стабілізації тиску, формує керуючі сигнали для перетворювача частоти та забезпечує захист обладнання від аварійних режимів. До таких режимів належать робота насоса без води, перевищення допустимого тиску, аварія електродвигуна, несправність частотного перетворювача, зниження рівня води у резервуарі або відсутність сигналу від датчика.

Крім автоматичного режиму, насосна станція повинна мати можливість ручного керування. Це необхідно для проведення налагоджувальних робіт,

технічного обслуговування або роботи у разі відмови окремих елементів автоматики. Також важливо передбачити індикацію стану обладнання, аварійну сигналізацію та можливість зміни уставки тиску оператором.

З точки зору автоматичного керування насосна станція є об'єктом із зворотним зв'язком. Вхідними величинами системи є задане значення тиску, сигнали від датчиків і команди оператора. Вихідними величинами є частота обертання електродвигуна, команди пуску та зупинки насосів, а також сигнали керування виконавчими механізмами. Основним збурюючим впливом є зміна витрати води у мережі [16].

1.2 Опис системи автоматизації насосної станції

Система автоматизації насосної станції призначена для забезпечення стабільної роботи обладнання водопостачання в автоматичному та ручному режимах, підтримання заданого тиску в напірному трубопроводі, контролю основних технологічних параметрів, захисту насосних агрегатів від аварійних режимів та зменшення енергоспоживання. Основною функцією системи є автоматичне регулювання продуктивності насосів відповідно до поточного водоспоживання у мережі [16].

У даній роботі розглядається автоматизована насосна станція зі стабілізацією тиску в системі водопостачання. Регулювання тиску здійснюється за допомогою частотно-регульованого електропривода насосного агрегату. Такий спосіб керування дозволяє змінювати частоту обертання електродвигуна насоса, а отже — плавно змінювати подачу води в мережу. Завдяки цьому забезпечується підтримання заданого значення тиску без частих пусків і зупинок насосів.

До складу системи автоматизації насосної станції входять такі основні елементи: програмований логічний контролер, датчики тиску, рівня та стану обладнання, перетворювач частоти, електродвигуни насосів, виконавчі

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

механізми, апаратура захисту, операторська панель НМІ та шафа керування. Взаємодія між цими елементами забезпечує контроль технологічного процесу та автоматичне прийняття рішень залежно від стану системи.

Основним регульованим параметром у системі є тиск у напірному трубопроводі. Його вимірювання здійснюється датчиком тиску, встановленим на вихідній магістралі насосної станції. Сигнал з датчика надходить на вхід програмованого логічного контролера. Контролер порівнює фактичне значення тиску із заданою уставкою та формує керуючий сигнал для перетворювача частоти. Якщо тиск у мережі знижується, контролер збільшує частоту обертання електродвигуна насоса. Якщо тиск перевищує задане значення, частота обертання зменшується [17].

Для реалізації автоматичного регулювання доцільно використовувати ПІД-регулятор, який може бути реалізований програмно в контролері. ПІД-регулятор дозволяє зменшити статичну похибку, підвищити точність стабілізації тиску та забезпечити плавну зміну керуючого сигналу. Завдяки цьому насосна станція працює більш стабільно навіть при зміні витрати води споживачами.

Функціональна структура системи автоматизації насосної станції наведена на рисунку 1.3.

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

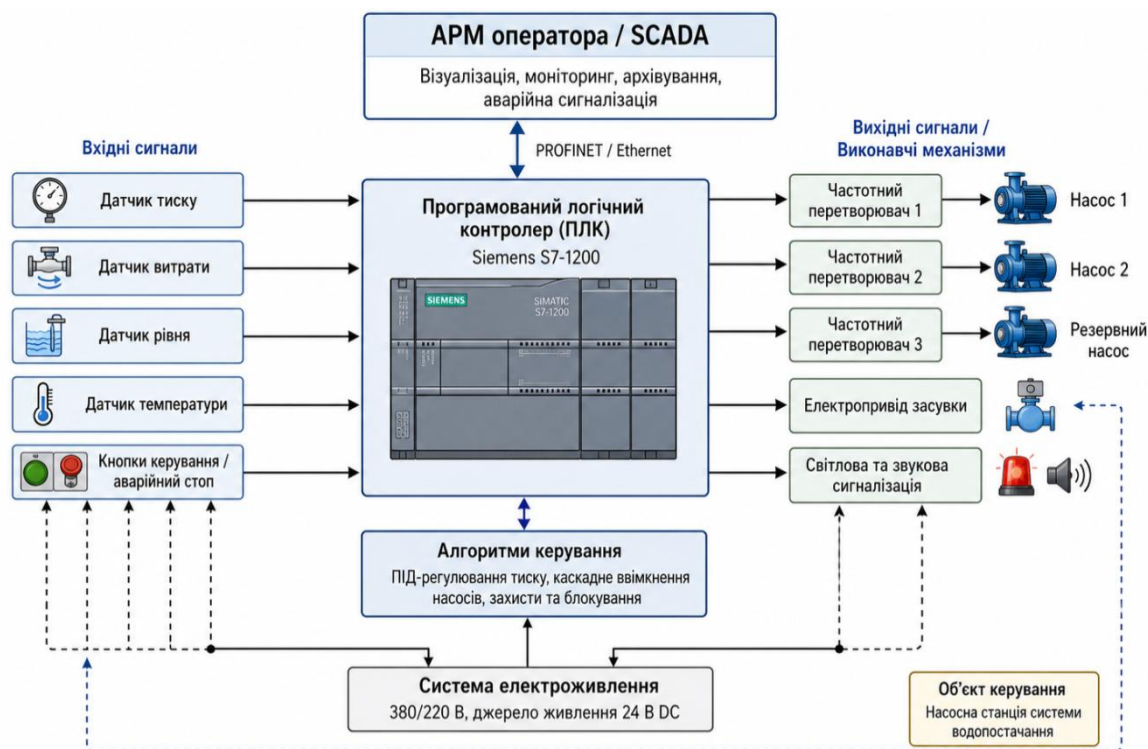


Рисунок 1.3 – Функціональна структура системи автоматизації насосної станції

У наведеній структурі оператор задає необхідне значення тиску через НМІ-панель або інший засіб керування. Програмований логічний контролер отримує інформацію від датчика тиску, датчиків рівня, сигналів стану насосів, перетворювача частоти та апаратури захисту. На основі отриманих даних контролер формує сигнали керування для запуску насосів, регулювання швидкості електродвигуна, перемикання робочого та резервного агрегатів, а також для формування аварійної сигналізації.

Важливою частиною системи є перетворювач частоти. Він забезпечує плавний пуск електродвигуна, регулювання швидкості обертання насоса та захист електропривода від перевантажень. Використання частотного перетворювача дозволяє зменшити пускові струми, знизити механічне навантаження на насос і трубопроводи, а також уникнути гідравлічних ударів під час запуску або зупинки насосного агрегату.

Для підвищення надійності насосної станції передбачається використання декількох насосних агрегатів. Один насос може працювати як основний, другий — як допоміжний, а третій — як резервний. У разі недостатньої продуктивності одного насоса система може автоматично підключати додатковий агрегат. Якщо один із насосів переходить в аварійний стан, контролер блокує його роботу та запускає резервний насос. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервність водопостачання навіть у разі відмови окремого обладнання.

Загальний принцип роботи системи автоматизації насосної станції можна описати таким чином. Після подачі живлення система виконує перевірку готовності обладнання: наявність сигналів від датчиків, справність перетворювача частоти, відсутність аварійних сигналів, достатній рівень води у резервуарі та готовність насосних агрегатів до запуску. Якщо всі умови виконані, система переходить у режим очікування або автоматичного керування.

Після отримання команди на запуск контролер вмикає робочий насос через перетворювач частоти. Частота обертання електродвигуна поступово збільшується, що забезпечує плавне наростання тиску в напірному трубопроводі. Далі система переходить у режим стабілізації тиску. У цьому режимі контролер постійно порівнює фактичний тиск із заданим значенням і змінює швидкість обертання насоса залежно від відхилення.

У разі збільшення водоспоживання тиск у мережі зменшується. Датчик тиску фіксує це відхилення, після чого контролер збільшує частоту обертання електродвигуна насоса. Якщо продуктивності одного насоса недостатньо, система може подати команду на запуск додаткового насосного агрегату. У разі зменшення водоспоживання тиск у трубопроводі підвищується, тому контролер зменшує частоту обертання насоса або вимикає додатковий агрегат.

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Крім стабілізації тиску, система автоматизації виконує функції технологічного захисту. До основних захисних функцій належать: захист від роботи насоса без води, контроль мінімального та максимального тиску, захист електродвигуна від перевантаження, контроль аварії перетворювача частоти, контроль обриву або некоректного сигналу датчика тиску, контроль рівня води в резервуарі, а також аварійне вимкнення обладнання при виникненні небезпечних режимів.

Для зручності експлуатації насосної станції передбачається операторська панель НМІ. На ній відображаються основні параметри роботи системи: поточний тиск у мережі, задане значення тиску, частота обертання електродвигуна, стан насосів, наявність аварій, режим роботи системи та повідомлення для оператора. Через НМІ-панель оператор може змінювати уставку тиску, обирати режим роботи, запускати або зупиняти насосні агрегати, переглядати аварійні повідомлення та контролювати стан обладнання.

Система автоматизації повинна забезпечувати декілька режимів роботи: автоматичний, ручний та аварійний. В автоматичному режимі стабілізація тиску виконується без участі оператора за заданим алгоритмом. У ручному режимі оператор має можливість керувати запуском і зупинкою насосів, що необхідно під час налагодження, ремонту або технічного обслуговування. Аварійний режим активується у разі виникнення небезпечних умов роботи, при цьому система зупиняє відповідне обладнання та формує сигналізацію [29].

Вхідними сигналами системи автоматизації є сигнали від датчика тиску, датчика рівня, кнопок керування, аварійних контактів, захисних пристроїв та сигналів стану перетворювача частоти. Вихідними сигналами є команди

запуску насосів, сигнали керування частотним перетворювачем, сигнали індикації, аварійної сигналізації та блокування роботи обладнання. Такий

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

розподіл сигналів дозволяє чітко організувати взаємодію між технологічною частиною насосної станції та системою керування.

1.3 Аналіз існуючих рішень

Насосні станції систем водопостачання є важливими технологічними об'єктами, основним завданням яких є забезпечення необхідної подачі води споживачам із підтриманням заданого тиску в трубопровідній мережі. Якість роботи насосної станції значною мірою залежить від способу керування насосними агрегатами, рівня автоматизації, наявності засобів контролю параметрів та можливості оперативного реагування на зміну режимів водоспоживання [3].

У сучасних системах водопостачання застосовуються різні рішення автоматизації насосних станцій. Найпростішим варіантом є релейно-контакторна система керування, у якій пуск і зупинка насосів здійснюються за сигналами від датчиків тиску, рівня або за командами оператора. Такі системи мають просту конструкцію, відносно низьку вартість і не потребують складного програмного забезпечення. Однак їхнім суттєвим недоліком є обмежена гнучкість, відсутність плавного регулювання продуктивності насосів, підвищені пускові струми електродвигунів та значне механічне навантаження на обладнання. Крім того, при такому способі керування тиск у мережі підтримується недостатньо точно, що може призводити до гідравлічних ударів, перевитрати електроенергії та зниження ресурсу насосного обладнання [2].

Більш досконалим рішенням є використання автоматичних шаф керування з локальними регуляторами тиску. У таких системах сигнал від датчика тиску надходить на регулятор, який формує команду для ввімкнення або вимкнення насосів. Це дозволяє частково автоматизувати процес підтримання тиску та зменшити участь оператора. Проте такі рішення часто мають обмежені можливості щодо зміни алгоритмів керування, архівування

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів, діагностики аварійних ситуацій та інтеграції з диспетчерськими системами. Через це їх використання є доцільним переважно для невеликих насосних установок із простим технологічним режимом.

Одним із найефективніших сучасних рішень є автоматизація насосної станції на базі програмованого логічного контролера, частотних перетворювачів та датчиків технологічних параметрів. У такій системі ПЛК отримує сигнали від датчиків тиску, витрати, рівня води та температури, обробляє їх відповідно до заданого алгоритму і формує керуючі дії для частотних перетворювачів, електроприводів засувки та системи сигналізації. Основним регульованим параметром є тиск у напірному трубопроводі, який підтримується шляхом зміни частоти обертання електродвигуна насоса.

Застосування частотного перетворювача дозволяє плавно змінювати продуктивність насоса відповідно до фактичного водоспоживання. При зменшенні витрати води частота обертання двигуна знижується, що забезпечує економію електроенергії та зменшує зношування обладнання. При збільшенні споживання води система автоматично підвищує продуктивність насоса або вмикає додатковий насосний агрегат. Такий підхід забезпечує більш точне підтримання тиску, зменшує кількість пусків і зупинок двигунів, підвищує надійність роботи насосної станції та продовжує строк служби обладнання [1].

Для насосних станцій із кількома насосами доцільно застосовувати каскадне керування. У цьому випадку один насос може працювати як основний із регулюванням швидкості через частотний перетворювач, а інші насоси вмикаються за потреби при зростанні навантаження. Також передбачається наявність резервного насоса, який автоматично підключається у разі аварії або відмови основного агрегату. Каскадне керування дає змогу рівномірно розподіляти напруження між насосами, зменшувати енергоспоживання та забезпечувати безперервність водопостачання.

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Важливим елементом сучасної автоматизованої системи є диспетчеризація на базі SCADA або операторської панелі HMI. Вона забезпечує візуалізацію поточного стану насосної станції, відображення значень тиску, витрати, рівня води, стану насосів, частотних перетворювачів і аварійних повідомлень. Оператор має можливість контролювати роботу обладнання, змінювати задані параметри, переглядати архів подій та швидко реагувати на нештатні ситуації. Наявність SCADA-системи особливо важлива для промислових і комунальних насосних станцій, де потрібен постійний контроль за технологічним процесом [28].

Окрему увагу слід приділити системам захисту та блокування. Автоматизована насосна станція повинна мати захист від роботи «всуху», перевищення тиску, зниження рівня води у резервуарі, перевантаження електродвигуна, аварії частотного перетворювача, зникнення живлення та несправності датчиків. У разі виникнення аварійної ситуації контролер повинен зупиняти відповідний насос, вмикати резервний агрегат або переводити систему в безпечний режим роботи з подачею сигналу оператору [18].

Порівняння існуючих рішень показує, що релейно-контакторні схеми є простими та дешевими, але не забезпечують високої точності стабілізації тиску й енергоефективності. Локальні регулятори тиску є більш зручними, але мають обмежені можливості для розширення та диспетчеризації. Найбільш раціональним рішенням для насосної станції зі стабілізацією тиску є система на базі ПЛК, частотного перетворювача, датчиків тиску та SCADA/HMI. Така структура забезпечує автоматичне регулювання тиску, енергоощадну роботу насосів, захист обладнання, контроль аварійних ситуацій і можливість подальшого розширення системи.

Для теми дипломної роботи доцільно обрати рішення з використанням програмованого логічного контролера Siemens S7-1200, частотного

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

перетворювача для керування насосним агрегатом, датчика тиску в напірному трубопроводі та операторського інтерфейсу для моніторингу. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до автоматизації насосних станцій, забезпечує стабільний тиск у системі водопостачання, підвищує надійність роботи обладнання та зменшує витрати електроенергії [27].

1.4 Експлуатаційні вимоги до системи

Система автоматизації насосної станції зі стабілізацією тиску в системі водопостачання повинна забезпечувати надійну, безпечну та безперервну роботу технологічного обладнання в автоматичному, ручному та аварійному режимах. Основним завданням системи є підтримання заданого значення тиску в напірному трубопроводі незалежно від зміни водоспоживання.

Система повинна забезпечувати автоматичне керування насосними агрегатами на основі сигналів від датчиків тиску, рівня, витрати та стану обладнання. Регулювання тиску має здійснюватися шляхом зміни частоти обертання електродвигуна насоса за допомогою частотного перетворювача. У разі збільшення споживання води система повинна автоматично підвищувати продуктивність насосного агрегату або вмикати додатковий насос. У разі зменшення споживання — знижувати частоту обертання двигуна або вимикати зайві агрегати.

Автоматизована система повинна підтримувати стабільний тиск у заданих межах, не допускаючи різких коливань, гідравлічних ударів та перевищення допустимих параметрів трубопровідної мережі. Значення уставки тиску повинно задаватися оператором через панель керування або SCADA-систему. При цьому система має контролювати фактичне значення тиску та порівнювати його із заданим значенням [11].

Система повинна мати можливість роботи в таких режимах:

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- автоматичний режим, при якому керування насосами здійснюється програмованим логічним контролером відповідно до заданого алгоритму;
- ручний режим, при якому оператор може здійснювати пуск і зупинку насосів із панелі керування;
- аварійний режим, при якому обладнання переводиться у безпечний стан при виникненні несправностей або небезпечних параметрів.

У системі необхідно передбачити захист насосного обладнання від аварійних режимів роботи. До таких захистів належать: захист від роботи насоса «всуху», захист від перевищення тиску, захист від зниження рівня води у резервуарі, захист від перевантаження електродвигуна, контроль аварії частотного перетворювача, контроль обриву або несправності датчиків, а також захист від зникнення або зниження напруги живлення.

У разі виникнення аварійної ситуації система повинна автоматично зупиняти відповідний насосний агрегат, формувати сигнал аварії та передавати інформацію оператору. За наявності резервного насоса система повинна забезпечувати його автоматичне ввімкнення при відмові основного насоса або при недостатній продуктивності робочих агрегатів [30].

Система автоматизації повинна забезпечувати світлову та звукову сигналізацію про основні стани обладнання: роботу насоса, зупинку насоса, аварію електродвигуна, аварію частотного перетворювача, низький рівень води, перевищення тиску та спрацювання аварійного зупину. Сигнали повинні бути зрозумілими для оперативного персоналу та відображатися на операторській панелі або в SCADA-системі.

Для зручності експлуатації система повинна забезпечувати візуалізацію основних технологічних параметрів: поточного тиску, заданого тиску, стану насосів, частоти обертання електродвигуна, рівня води, витрати, стану засувки та наявності аварій. Оператор повинен мати можливість переглядати поточний

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стан обладнання, змінювати уставки в допустимих межах, переглядати повідомлення про аварії та контролювати роботу системи.

Електроживлення системи автоматизації повинно забезпечувати стабільну роботу контролера, датчиків, виконавчих механізмів і засобів сигналізації. Для живлення силового обладнання використовується мережа 380/220 В, а для живлення контролера та датчиків — джерело постійної напруги 24 В DC. У системі повинні бути передбачені автоматичні вимикачі, захисні апарати та засоби відключення живлення у разі аварійної ситуації.

Обладнання системи автоматизації повинно бути розміщене у шафі керування, яка забезпечує захист апаратури від пилу, вологи, механічних пошкоджень та несанкціонованого доступу. Конструкція шафи повинна забезпечувати зручність технічного обслуговування, можливість підключення кабелів, перевірки сигналів і заміни окремих елементів системи.

Програмне забезпечення контролера повинно бути побудоване таким чином, щоб забезпечувати стабільну роботу насосної станції, можливість зміни параметрів регулювання, діагностику несправностей та безпечне завершення роботи у разі аварії. Алгоритм керування повинен передбачати плавний пуск і зупинку насосів, каскадне ввімкнення агрегатів, контроль справності датчиків і блокування небезпечних команд [2].

Система повинна бути простою в експлуатації та зрозумілою для обслуговуючого персоналу. Органи керування, індикація та аварійні повідомлення повинні мати чітке позначення. Операторська панель повинна відображати інформацію у зручній формі та не перевантажувати користувача зайвими даними.

Технічне обслуговування системи повинно виконуватися без складного демонтажу обладнання. Необхідно передбачити можливість перевірки працездатності датчиків, виконавчих механізмів, частотного перетворювача,

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

контролера та системи сигналізації. Також система повинна дозволяти швидке виявлення несправного елемента за допомогою повідомлень про аварії або діагностичних сигналів. Експлуатаційні вимоги до системи автоматизації насосної станції спрямовані на забезпечення стабільного тиску в системі водопостачання, підвищення надійності роботи обладнання, зменшення енергоспоживання, захист насосних агрегатів від аварійних режимів та створення зручних умов для роботи оперативного персоналу.

1.5 Постановка завдань дослідження

Метою дипломної роботи є розробка та дослідження системи автоматизації насосної станції зі стабілізацією тиску в системі водопостачання із застосуванням програмного середовища MATLAB/Simulink для моделювання технологічного процесу та TIA Portal для розробки алгоритму керування на базі програмованого логічного контролера.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати насосну станцію як об'єкт автоматизації, визначити її основні елементи, технологічні параметри та особливості роботи в системі водопостачання.
- Визначити основний регульований параметр системи — тиск у напірному трубопроводі, а також параметри, що впливають на його зміну: витрату води, продуктивність насосів, частоту обертання електродвигуна та режим водоспоживання.
- Виконати аналіз існуючих способів автоматизації насосних станцій і обґрунтувати доцільність застосування системи керування на базі ПЛК, частотного перетворювача та датчика тиску.
- Розробити математичну та імітаційну модель насосної станції в середовищі MATLAB/Simulink для дослідження процесу стабілізації тиску в системі водопостачання.

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- Побудувати модель роботи насосного агрегату, трубопровідної мережі та регулятора тиску з урахуванням зміни водоспоживання.
- Дослідити в MATLAB/Simulink перехідні процеси системи при зміні заданого тиску, зміні навантаження та ввімкненні або вимкненні насосного обладнання.
- Обґрунтувати вибір алгоритму керування, який забезпечує підтримання заданого тиску, плавний пуск насосів, зменшення коливань тиску та захист обладнання від аварійних режимів.
- Розробити функціональну структуру системи автоматизації насосної станції із зазначенням вхідних сигналів, виконавчих механізмів, контролера, операторської панелі та системи електроживлення.
- Обрати основні технічні засоби автоматизації: програмований логічний контролер, датчик тиску, датчики рівня та витрати, частотний перетворювач, виконавчі механізми, засоби сигналізації та операторський інтерфейс.
- Розробити алгоритм керування насосною станцією в середовищі TIA Portal з використанням програмованого логічного контролера Siemens S7-1200.
- Передбачити в програмі ПЛК основні режими роботи системи: автоматичний режим, ручне керування, аварійний режим і режим зупинки обладнання.
- Реалізувати в TIA Portal логіку стабілізації тиску, обробку сигналів від датчиків, керування частотним перетворювачем, пуск і зупинку насосів, а також аварійні блокування.
- Перевірити працездатність запропонованої системи керування шляхом аналізу результатів моделювання в MATLAB/Simulink та логіки роботи програми в TIA Portal.
- Оцінити ефективність розробленої системи з точки зору стабільності підтримання тиску, надійності, енергоефективності та зручності експлуатації.

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

У результаті виконання поставлених завдань має бути розроблено автоматизовану систему керування насосною станцією, яка поєднує математичне моделювання технологічного процесу в MATLAB/Simulink і програмну реалізацію алгоритму керування в TIA Portal. Запропоноване рішення повинно забезпечувати стабілізацію тиску в системі водопостачання, захист насосного обладнання, можливість контролю параметрів оператором та підвищення ефективності роботи насосної станції.

Висновки за розділом:

У першому розділі кваліфікаційної роботи виконано комплексний аналіз насосної станції як об'єкта автоматизації та розглянуто особливості її функціонування у складі системи водопостачання. Встановлено, що основним завданням насосної станції є забезпечення безперервної подачі води зі стабільним підтриманням необхідного тиску незалежно від зміни режимів водоспоживання.

Проведено аналіз принципів роботи сучасних автоматизованих насосних станцій, розглянуто їх складові елементи та визначено взаємозв'язок між насосними агрегатами, датчиками технологічних параметрів, частотними перетворювачами, програмованими логічними контролерами та операторськими панелями. Показано, що застосування систем автоматичного керування дозволяє підвищити надійність роботи обладнання, зменшити вплив людського фактора та забезпечити економне використання електроенергії.

У результаті аналізу існуючих технічних рішень встановлено, що найбільш ефективним способом підтримання стабільного тиску є використання програмованого логічного контролера Siemens S7-1200 спільно з частотним перетворювачем та датчиком тиску. Така структура дозволяє реалізувати алгоритм плавного регулювання продуктивності насосів, автоматичне підключення резервного обладнання та комплексний захист

					КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

насосної станції від аварійних режимів. Також визначено основні експлуатаційні вимоги до системи автоматизації, сформовано перелік функцій керування, контролю та сигналізації, які повинні бути реалізовані в програмному забезпеченні контролера. На підставі проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження, які стали основою для побудови математичної моделі, виконання моделювання та програмної реалізації системи автоматичного керування у наступному розділі.

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖУВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Аналіз технологічних параметрів насосної станції

Насосна станція є важливим елементом системи технічного водопостачання промислового підприємства. Її основне призначення полягає у забезпеченні необхідної витрати води та підтриманні стабільного тиску в трубопроводній мережі. У межах даної роботи досліджується автоматизована насосна станція зі стабілізацією тиску в системі водопостачання, яка може використовуватися на промисловому підприємстві, зокрема на прикладі підприємства ArcelorMittal Кривий Ріг.

У промислових умовах вода використовується для багатьох технологічних потреб: охолодження обладнання, пилоподавлення, промивання матеріалів, забезпечення роботи допоміжних установок, транспортування технологічних середовищ та підтримання нормального режиму роботи окремих виробничих ділянок. Тому насосна станція повинна забезпечувати безперервну подачу води навіть при змінному споживанні [12].

Основними технологічними параметрами насосної станції є витрата води, напір, тиск у напірному трубопроводі, рівень води в резервуарі, потужність електродвигунів, частота обертання насосів та енергоспоживання. Саме ці параметри визначають режим роботи станції та є основою для побудови математичної моделі системи автоматичного керування.

Витрата води характеризує кількість рідини, яка проходить через трубопровід за одиницю часу. Вона може вимірюватися у $\text{м}^3/\text{год}$, л/с або $\text{м}^3/\text{с}$. Для насосної станції промислового підприємства витрата не є сталою величиною, оскільки залежить від кількості одночасно працюючих

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

споживачів. У години максимального навантаження витрата зростає, а в періоди зменшення технологічного споживання — знижується.

Напір насоса визначає здатність насосного агрегату переміщувати воду по трубопровідній мережі та долати гідравлічні опори. Він залежить від геометричної висоти підйому, втрат тиску в трубопроводах, місцевих опорів, а також від необхідного тиску у споживачів. Для стабільної роботи системи водопостачання насос повинен створювати такий напір, який забезпечить подачу води до найвіддаленіших або найбільш навантажених ділянок мережі.

Тиск у системі є основним регульованим параметром. У даній роботі прийнято, що задане значення тиску в напірному трубопроводі становить 3,5 бар. Саме це значення використовується як уставка системи автоматичного регулювання. Якщо фактичний тиск зменшується нижче заданого, система керування повинна збільшити продуктивність насосного агрегату. Якщо тиск перевищує задане значення, продуктивність насоса необхідно зменшити.

Рівень води в резервуарі також є важливим контрольованим параметром. Якщо рівень води знижується нижче допустимого значення, виникає небезпека роботи насоса без води, тобто режим «сухого ходу». Такий режим є небезпечним, оскільки може призвести до перегріву, пошкодження ущільнень, кавітації та виходу насоса з ладу. Тому в системі автоматизації передбачено контроль мінімального рівня води та блокування запуску насосів при його зниженні [23].

Для досліджуваної насосної станції приймається схема з трьома насосними агрегатами. Перший насос є основним, другий — допоміжним, а третій — резервним. Основний насос забезпечує подачу води при нормальному навантаженні. Якщо витрата води збільшується і одного насоса недостатньо для підтримання тиску, до роботи підключається другий насос. Третій насос використовується у випадку аварії одного з робочих агрегатів або при значному зниженні тиску в системі.

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Для плавного регулювання продуктивності насосної станції використовується частотний перетворювач. Він змінює частоту живлення асинхронного електродвигуна, внаслідок чого змінюється швидкість обертання робочого колеса насоса. Це дозволяє уникнути різких пусків і зупинок, зменшити механічні навантаження на трубопроводи та обладнання, а також знизити енергоспоживання.

У системі автоматичного керування застосовується програмований логічний контролер, який обробляє сигнали від датчиків тиску та рівня, виконує алгоритм регулювання, формує команди для частотного перетворювача та керує запуском насосних агрегатів. Для взаємодії оператора із системою використовується НМІ-панель, на якій відображаються поточні значення тиску, рівня води, стан насосів, режим роботи та аварійні повідомлення.

Отже, досліджувана насосна станція є складним технічним об'єктом, який поєднує гідравлічні, електромеханічні та інформаційно-керуючі процеси. Для її ефективної автоматизації необхідно розробити математичну модель, яка дозволить описати динаміку зміни тиску в системі та оцінити якість роботи регулятора.

2.2 Розрахунок продуктивності насосного обладнання

Продуктивність насосної станції визначається необхідною витратою води, яку потрібно подати до споживачів системи водопостачання. Для промислового підприємства витрата води залежить від технологічного процесу, кількості працюючого обладнання, режиму зміни та особливостей роботи окремих ділянок.

Загальна витрата води насосною станцією може бути визначена як сума витрат окремих споживачів:

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

$$Q_{\text{заг}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (2.1)$$

де:

$Q_{\text{заг}}$ — загальна витрата води насосною станцією;

Q_1, Q_2, Q_3 — витрати води окремими споживачами;

n — кількість споживачів.

Для прикладу можна прийняти, що насосна станція забезпечує подачу води до трьох основних технологічних ділянок підприємства. Перша ділянка використовує воду для охолодження обладнання, друга — для пилоподавлення, третя — для промивання або допоміжних технологічних операцій.

Умовно приймемо такі витрати:

$$Q_1 = 40 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$Q_2 = 30 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$Q_3 = 20 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Тоді загальна витрата води становитиме:

$$Q_{\text{заг}} = 40 + 30 + 20 = 90 \text{ м}^3/\text{год}$$

Для урахування можливих коливань споживання, втрат у мережі та резерву продуктивності вводиться коефіцієнт запасу. Зазвичай він може становити 1,1–1,3 залежно від характеру системи. У даній роботі приймемо коефіцієнт запасу:

$$k_3 = 1,2.$$

Тоді розрахункова продуктивність насосної станції дорівнює:

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{\text{розр}} = Q_{\text{заг}} * k_3 \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{розр}} = 90 * 1,2 = 108 \text{ м}^3/\text{год}$$

Отже, насосна станція повинна забезпечувати продуктивність приблизно 108 м³/год. Оскільки у системі передбачено три насосні агрегати, продуктивність одного насоса може бути обрана з урахуванням каскадного режиму роботи [16].

Таблиця 2.1 – Сумарні витрати води технологічними споживачами

Споживач	Призначення води	Витрата, м³/год	Коефіцієнт одночасності	Розрахункова витрата, м³/год
Ділянка охолодження обладнання	Охолодження підшипників, теплообмінників, приводів	40	1,0	40
Система пилоподавлення	Зменшення запиленості у виробничій зоні	30	1,0	30
Допоміжні технологічні споживачі	Промивання, зрошення, допоміжні операції	20	1,0	20
Разом без запасу	-	90	-	90
Разом з коефіцієнтом запасу 1,2	-	-	-	108

Якщо основний насос покриває базове навантаження, його продуктивність може становити приблизно 50–60% від загальної розрахункової витрати. Другий насос підключається при збільшенні навантаження, а третій виконує функцію резерву [25].

Для спрощеного розрахунку можна прийняти, що кожен із двох робочих насосів має продуктивність:

$$Q_{\text{нас}} = \frac{Q_{\text{розр}}}{2} \quad (2.3)$$

$$Q_{\text{нас}} = \frac{108}{2} = 54 \text{ м}^3/\text{год}$$

Таким чином, для досліджуваної насосної станції доцільно прийняти два робочі насоси продуктивністю приблизно 54 м³/год кожен та один резервний насос аналогічної продуктивності. Така схема забезпечує гнучке керування, можливість резервування та підвищує надійність системи водопостачання.

Важливо зазначити, що реальна продуктивність насосів залежить від їх напірної характеристики, частоти обертання, гідравлічного опору мережі та режиму роботи частотного перетворювача. При зменшенні частоти обертання продуктивність насоса знижується, що дозволяє адаптувати роботу насосної станції до поточного споживання води.

Залежність продуктивності насоса від частоти обертання можна наближено описати законом подібності:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.4)$$

де:

Q_1 і Q_2 — продуктивність насоса при різних швидкостях обертання;
 n_1 і n_2 — відповідні швидкості обертання робочого колеса.

З цього випливає, що при зменшенні швидкості обертання насоса зменшується і подача води. Саме ця властивість використовується у системі автоматичного регулювання тиску.

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Розрахунок напору та робочого тиску насосної станції

Напір насосної станції повинен забезпечувати транспортування води від джерела до споживачів із подоланням усіх втрат у трубопровідній мережі. Загальний необхідний напір визначається як сума геометричного напору, втрат напору в трубопроводах, місцевих втрат та необхідного залишкового напору у споживача.

Загальний напір можна записати у вигляді:

$$H_{\text{заг}} = H_{\text{г}} + H_{\text{вт}} + H_{\text{м}} + H_{\text{сп}} \quad (2.5)$$

де:

$H_{\text{заг}}$ — загальний необхідний напір;

$H_{\text{г}}$ — геометрична висота підйому води;

$H_{\text{вт}}$ — втрати напору по довжині трубопроводу;

$H_{\text{м}}$ — місцеві втрати напору;

$H_{\text{сп}}$ — необхідний напір у споживача.

Для промислової насосної станції, що подає воду до технологічних споживачів, геометрична висота підйому може бути порівняно невеликою, однак значну роль відіграють втрати у трубопровідній мережі. Вони залежать від довжини трубопроводів, діаметра труб, швидкості руху води, шорсткості внутрішньої поверхні та кількості місцевих опорів [29].

У системах водопостачання тиск часто задається у барах. Для переходу від напору до тиску використовується співвідношення:

$$p = \rho * g * H \quad (2.6)$$

де:

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

p — тиск, Па;

ρ — густина води, кг/м³;

g — прискорення вільного падіння, м/с²;

H — напір, м.

Оскільки 1 бар приблизно відповідає 10 м водяного стовпа, то уставка тиску 3,5 бар відповідає напору приблизно:

$$H = 3,5 * 10 = 35\text{м}$$

Отже, для підтримання тиску 3,5 бар насосна станція повинна забезпечувати напір приблизно 35 м водяного стовпа з урахуванням втрат у трубопроводній мережі.

Якщо врахувати втрати в трубопроводі та місцевих опорах, фактичний напір насоса повинен бути більшим. Наприклад, якщо геометричний напір становить 10 м, втрати по довжині трубопроводу — 8 м, місцеві втрати — 4 м, а необхідний залишковий напір у споживача — 35 м, то загальний напір становитиме:

$$H_{\text{заг}} = 10 + 8 + 4 + 35 = 57\text{м}$$

У такому випадку насосний агрегат повинен бути підібраний за характеристикою так, щоб при необхідній витраті він створював напір не менше 57 м [17].

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Таблиця 2.2 – Розрахунок необхідного напору насосної станції

Складова напору	Позначення	Значення, м	Пояснення
Геометрична висота підйому	H_g	10	Різниця рівнів між джерелом та споживачем
Втрати по довжині трубопроводу	$H_{вт}$	8	Опір трубопровідної мережі
Місцеві втрати	H_m	4	Втрати у засувках, клапанах, поворотах
Необхідний напір у споживача	$H_{сп}$	35	Відповідає тиску 3,5 бар
Загальний необхідний напір	$H_{заг}$	57	Розрахунковий напір насосного агрегату

Робочий тиск у системі є одним із ключових параметрів автоматичного регулювання. У процесі експлуатації він змінюється залежно від витрати води. При збільшенні споживання тиск у трубопроводі зменшується, оскільки насосна станція повинна подати більшу кількість води. При зменшенні споживання тиск, навпаки, може підвищуватися.

Для запобігання коливанням тиску використовується замкнена система автоматичного регулювання. Вона складається з датчика тиску, контролера, регулятора, частотного перетворювача, електродвигуна та насоса. Датчик тиску вимірює фактичне значення параметра, після чого сигнал надходить до ПЛК. Контролер порівнює фактичний тиск із заданим значенням і формує керуючий сигнал.

У даній роботі прийнято такі межі роботи системи:

- заданий тиск — 3,5 бар;
- верхня аварійна межа тиску — 6,0 бар;

- нижня аварійна межа тиску — 1,0 бар;
- межа включення резервного насоса — 2,7 бар.

Якщо тиск перевищує 6,0 бар, система формує аварію високого тиску. Якщо тиск знижується нижче 1,0 бар, формується аварія низького тиску. Якщо тиск знижується нижче 2,7 бар, система формує сигнал необхідності включення резервного насоса.

Таблиця 2.3 – Межі контролю тиску в системі

Параметр	Значення, бар	Дія системи автоматизації
$p < 1,0$	Низький тиск	Формування аварії Low_Pressure
$1,0 \leq p < 2,7$	Недостатній тиск	Контроль режиму, можлива підготовка резерву
$p < 2,7$	Межа резервного режиму	Формування Pressure_Low_Reserve
$p = 3,5$	Робоча уставка	Підтримання тиску регулятором
$p > 6,0$	Високий тиск	Формування аварії High_Pressure

Такий підхід дозволяє не лише підтримувати тиск на заданому рівні, а й забезпечити захист обладнання від небезпечних режимів роботи.

2.4 Визначення витрати води у системі технічного водопостачання

Витрата води у системі технічного водопостачання є змінною величиною, яка залежить від режиму роботи технологічного обладнання. Для насосної станції промислового підприємства характерні значні коливання витрати протягом доби або виробничої зміни.

Основними факторами, які впливають на витрату води, є:

- кількість одночасно працюючих технологічних споживачів;

- режим роботи виробничої лінії;
- температурний режим обладнання;
- необхідність охолодження або промивання;
- режим пилоподавлення;
- стан трубопровідної мережі.

Для визначення витрати води можна використовувати як розрахунковий, так і експериментальний методи [12].

Розрахунковий метод базується на сумуванні витрат окремих споживачів, а експериментальний — на вимірюванні фактичної витрати за допомогою витратомірів.

У рамках даної роботи використовується розрахунковий підхід, оскільки основною метою є побудова математичної моделі системи керування та аналіз процесу стабілізації тиску.

Загальна витрата води визначається за формулою:

$$Q = v * A \quad (2.7)$$

де

Q — витрата води, $\text{м}^3/\text{с}$;

v — швидкість руху води в трубопроводі, $\text{м}/\text{с}$;

A — площа поперечного перерізу трубопроводу, м^2 .

Площа поперечного перерізу круглого трубопроводу визначається як:

$$A = \pi * d^2 / 4 \quad (2.8)$$

де:

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

d — внутрішній діаметр трубопроводу, м.

Якщо прийняти діаметр трубопроводу $d = 0,15$ м, то площа перерізу становитиме:

$$A = 3,14 * \frac{0,15^2}{4} = 0,0177 \text{ м}^2$$

При швидкості руху води $v = 1,7$ м/с витрата дорівнюватиме:

$$Q = 1,7 * 0,0177 = 0,0301 \text{ м}^3/\text{с}$$

Для переведення у $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Q = 0,0301 * 3600 = 108,36 \text{ м}^3/\text{год}$$

Отримане значення добре узгоджується з попередньо прийнятою розрахунковою продуктивністю насосної станції $108 \text{ м}^3/\text{год}$.

Таким чином, при діаметрі трубопроводу 150 мм і швидкості руху води близько 1,7 м/с насосна станція може забезпечувати необхідну витрату води для промислових споживачів.

Таблиця 2.4 - Межі контролю тиску в системі

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Діаметр трубопроводу	d	0,15	м
Площа перерізу	A	0,0177	м^2
Швидкість руху води	v	1,7	м/с
Витрата	Q	0,0301	$\text{м}^3/\text{с}$
Витрата	Q	108,36	$\text{м}^3/\text{год}$

Витрата води безпосередньо впливає на тиск у системі. Якщо споживання води збільшується, гідравлічний опір мережі також зростає, що

призводить до зниження тиску. Якщо споживання зменшується, тиск може збільшуватися. Тому система автоматичного керування повинна постійно адаптувати продуктивність насосів до поточного режиму водоспоживання [13].

2.5 Гідравлічний розрахунок трубопровідної мережі

Гідравлічний розрахунок трубопровідної мережі необхідний для визначення втрат напору, вибору діаметра трубопроводів, оцінки швидкості руху води та визначення необхідного напору насосів. У системах технічного водопостачання втрати напору можуть суттєво впливати на роботу насосної станції, особливо при великій довжині трубопроводів або наявності значної кількості місцевих опорів [26].

Втрати напору в трубопроводі складаються з двох основних частин:

- втрати по довжині трубопроводу;
- місцеві втрати.

Втрати напору по довжині можна визначити за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$h_d = \lambda * \left(\frac{L}{d}\right) * \left(\frac{v^2}{2g}\right) \quad (2.9)$$

де

h_d — втрати напору по довжині, м;

λ — коефіцієнт гідравлічного тертя;

L — довжина трубопроводу, м;

d — внутрішній діаметр трубопроводу, м;

v — швидкість руху води, м/с;

g — прискорення вільного падіння, м/с².

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Для прикладу прийmemo:

$$L = 120 \text{ м};$$

$$d = 0,15 \text{ м};$$

$$v = 1,7 \text{ м/с};$$

$$\lambda = 0,025;$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Тоді втрати по довжині становитимуть:

$$h_d = 0,025 * 800 * 0,147 = 2,94 \text{ м}$$

Спочатку визначимо:

$$\frac{L}{d} = \frac{120}{0,15} = 800$$

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{1,7^2}{19,62} = \frac{2,89}{19,62} = 0,147$$

Тоді:

$$h_d = 0,025 * 800 * 0,147 = 2,94 \text{ м}$$

Місцеві втрати напору виникають у засувках, поворотах, трійниках, зворотних клапанах, фільтрах та інших елементах трубопровідної системи. Вони визначаються за формулою:

$$h_m = \xi * \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.10)$$

де:

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

ξ — сумарний коефіцієнт місцевих опорів.

Для прикладу прийmemo сумарний коефіцієнт місцевих опорів:

$$\xi = 12.$$

Тоді:

$$h_m = 12 \cdot 0,147 = 1,76 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору в мережі:

$$h_{\text{вт}} = h_d + h_m.$$

$$h_{\text{вт}} = 2,94 + 1,76 = 4,7 \text{ м.}$$

Отже, при заданих параметрах трубопровідної мережі втрати напору становлять приблизно 4,7 м. У реальних промислових системах це значення може бути більшим через значну довжину трубопроводів, зношення труб, наявність фільтрів, арматури та зміну режимів роботи.

Гідравлічні втрати мають важливе значення для математичного моделювання насосної станції. Вони визначають, як змінюється тиск у системі при зміні витрати води. Чим більша витрата, тим більші втрати напору, а отже, тим сильніше змінюється тиск [25].

У системі автоматичного регулювання ці зміни компенсуються шляхом зміни швидкості обертання насоса. Якщо втрати в мережі зростають, контролер збільшує керуючий сигнал на частотний перетворювач. Якщо втрати зменшуються, керуючий сигнал знижується.

2.6 Побудова математичної моделі насосної станції

Математична модель насосної станції необхідна для дослідження динаміки зміни тиску в системі водопостачання та перевірки ефективності

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

вибраного алгоритму керування. У даній роботі насосна станція розглядається як об'єкт автоматичного керування, вхідною величиною якого є керуючий сигнал на частотний перетворювач, а вихідною величиною — тиск у напірному трубопроводі.

До складу досліджуваної системи входять:

- частотний перетворювач;
- асинхронний електродвигун;
- відцентровий насос;
- трубопровідна мережа;
- датчик тиску;
- ПД-регулятор;
- програмований логічний контролер.

Для спрощеного моделювання насосну станцію можна подати як аперіодичну ланку першого порядку із запізненням. Такий підхід є доцільним, оскільки процес зміни тиску в трубопроводі після зміни швидкості насоса має інерційний характер. Тиск не змінюється миттєво, а поступово наближається до нового сталого значення.

Передаточна функція об'єкта керування може бути записана у вигляді:

$$W_{об}(s) = \frac{K}{(T*s+1)*e^{(-\tau s)}} \quad (2.11)$$

де:

K — коефіцієнт підсилення об'єкта;

T — стала часу об'єкта;

τ — транспортне запізнення;

s — оператор Лапласа.

У даній роботі для моделювання приймаються такі параметри:

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K = 1,15;$$

$$T = 45 \text{ с};$$

$$\tau = 2,5 \text{ с}.$$

Коефіцієнт підсилення K показує, наскільки змінюється вихідний тиск при зміні керуючого сигналу. Стала часу T характеризує інерційність насосної станції. Чим більше значення T , тим повільніше система реагує на зміну керуючого сигналу. Запізнення τ враховує час проходження сигналу та реакцію гідравлічної системи [7].

Для стабілізації тиску використовується ПД-регулятор. Його загальний закон керування має вигляд:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t)dt + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

де:

$u(t)$ — керуючий сигнал;

$e(t)$ — похибка регулювання;

K_p — пропорційний коефіцієнт;

K_i — інтегральний коефіцієнт;

K_d — диференціальний коефіцієнт.

Похибка регулювання визначається як різниця між заданим і фактичним значенням тиску:

$$e(t) = p_{\text{зад}}(t) - p_{\text{факт}}(t) \quad (2.13)$$

У спрощеній моделі для насосної станції доцільно використовувати ПД-регулятор, оскільки диференціальна складова може підсилювати шум сигналу датчика тиску. ПД-регулятор забезпечує достатню якість регулювання, усуває статичну похибку та дозволяє плавно стабілізувати тиск.

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_p(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.14)$$

У даній роботі приймаються такі параметри регулятора:

$$K_p = 1,35;$$

$$K_i = 0,035.$$

Замкнена система автоматичного керування складається з регулятора та об'єкта керування. Її передаточна функція має вигляд:

$$W_3(s) = \frac{W_p(s) * W_{об}(s)}{(1 + W_p(s) * W_{об}(s))} \quad (2.15)$$

Ця модель дозволяє дослідити перехідний процес стабілізації тиску, оцінити час регулювання, перерегулювання та стійкість системи.

У моделі приймається, що заданий тиск становить:

$$p_{зад} = 3,5 \text{ бар.}$$

Початкове значення тиску:

$$p_{поч} = 2,4 \text{ бар.}$$

Після запуску системи регулятор формує керуючий сигнал на частотний перетворювач, частота обертання електродвигуна збільшується, насос підвищує продуктивність, і тиск у трубопроводі поступово зростає до заданого значення.

2.7 Моделювання системи автоматичного керування

2.7.1 Мета моделювання та постановка задачі

Одним із найбільш ефективних методів дослідження сучасних систем автоматичного керування є математичне моделювання, яке дозволяє оцінити роботу технологічного процесу без використання реального обладнання. Застосування програмного комплексу MATLAB Simulink дає можливість створити цифрову модель насосної станції, дослідити її динамічні характеристики, визначити стійкість системи та перевірити працездатність алгоритму автоматичного регулювання до його практичної реалізації. Для насосних станцій систем водопостачання підтримання стабільного тиску є одним із найважливіших технологічних завдань. Коливання водоспоживання, зміна гідравлічного опору мережі та пускові режими насосного обладнання призводять до зміни тиску, що негативно впливає на ефективність роботи системи та ресурс обладнання. Тому використання автоматичного регулювання із застосуванням програмованих логічних контролерів і частотних перетворювачів є найбільш доцільним рішенням.

Основною метою моделювання є дослідження процесу стабілізації тиску у системі водопостачання промислового підприємства при зміні технологічного навантаження та зовнішніх збурюючих впливів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- створити математичну модель насосної станції;
- реалізувати замкнену систему автоматичного керування зі зворотним зв'язком;
- дослідити перехідний процес регулювання тиску;
- оцінити вплив зміни водоспоживання на роботу системи;
- перевірити стійкість системи за допомогою частотного аналізу;
- реалізувати отриманий алгоритм у середовищі TIA Portal.

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Моделювання виконувалося у середовищі MATLAB Simulink, яке дозволяє створювати структурні моделі складних технічних систем із використанням стандартних функціональних блоків та бібліотек керування. Використання Simulink значно спрощує процес аналізу та налагодження систем автоматизації, оскільки дає можливість змінювати параметри моделі без фізичного втручання у роботу обладнання.

2.7.2 Структурна модель системи автоматичного керування

Розроблена модель являє собою класичну замкнену систему автоматичного регулювання тиску, побудовану за принципом негативного зворотного зв'язку.

До складу моделі входять такі функціональні елементи:

- блок формування заданого значення тиску;
- блок порівняння сигналів;
- ПІ-регулятор;
- блок обмеження керуючого сигналу;
- модель частотного перетворювача;
- модель асинхронного електродвигуна;
- модель відцентрового насоса;
- модель трубопровідної мережі;
- блок транспортного запізнення;
- модель датчика тиску;
- блоки збурюючих впливів;
- блоки індикації та реєстрації параметрів.

На рисунку 2.1 наведено структурну модель системи автоматичного керування насосною станцією, реалізовану у середовищі MATLAB Simulink [20].

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

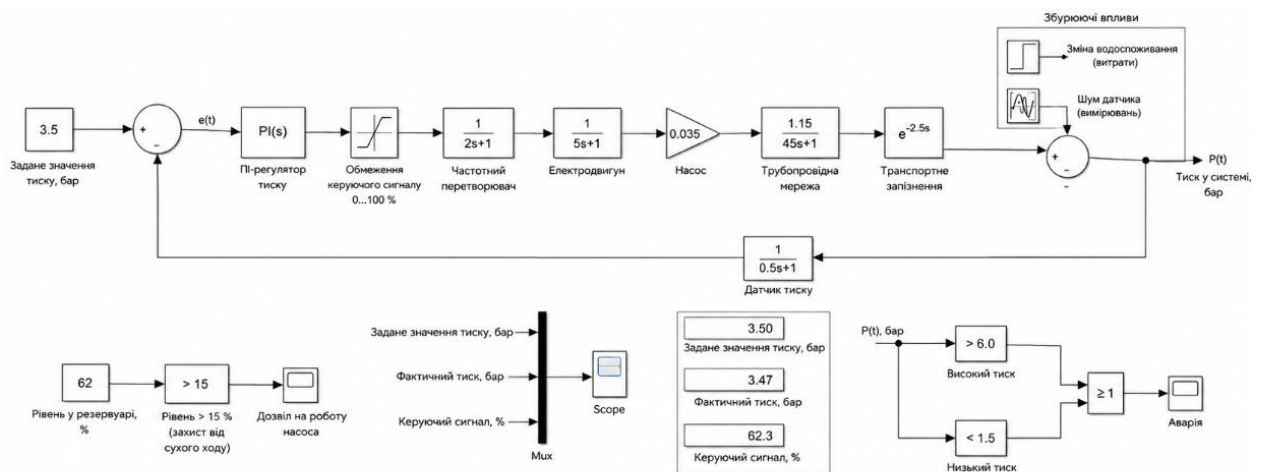


Рисунок 2.1 – Структурна модель системи автоматичного керування насосною станцією в MATLAB Simulink

На вхід системи надходить задане значення тиску:

$$P_{set} = 3.5 \text{ бар}$$

Поточне значення тиску, отримане від моделі датчика, надходить на другий вхід суматора, де визначається похибка регулювання:

$$e(t) = P_{set} - P_{fact} \quad (2.16)$$

Отримана похибка передається на ПІ-регулятор, який формує керуючий сигнал відповідно до закону:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.17)$$

Після цього сигнал проходить через блок обмеження, який імітує фізичні можливості частотного перетворювача та виключає перевищення допустимого діапазону керування.

Далі керуючий сигнал надходить до моделі частотного перетворювача, який змінює частоту живлення асинхронного двигуна. Зміна частоти

призводить до зміни швидкості обертання робочого колеса насоса та відповідно до зміни продуктивності насосного агрегату.

Модель насоса перетворює механічну швидкість обертання у тиск, який створюється у трубопровідній мережі.

Трубопровід представлений аперіодичною ланкою першого порядку, що враховує інерційність руху води та гідравлічні втрати.

Додатково у моделі використано блок транспортного запізнення, який відображає реальний час проходження води по трубопроводах та затримку реакції системи [8].

Після проходження через датчик тиску отримане значення повертається до суматора, формуючи негативний зворотний зв'язок.

Таким чином реалізовано повністю замкнений контур автоматичного регулювання, який забезпечує підтримання постійного тиску незалежно від зміни навантаження.

Таблиця 2.5 – Основні параметри моделі

Параметр	Значення
Заданий тиск	3,5 бар
Початковий тиск	2,4 бар
Тип регулятора	PI
Коефіцієнт пропорційної складової	1,35
Коефіцієнт інтегральної складової	0,035
Час транспортного запізнення	2,5 с
Час моделювання	300 с

2.7.3 Опис математичної моделі та алгоритму роботи системи автоматичного керування

Для дослідження процесу стабілізації тиску була розроблена математична модель насосної станції, яка описує взаємодію всіх основних елементів системи автоматичного керування. Побудова моделі здійснювалася за модульним принципом, що дозволяє окремо досліджувати вплив кожного елемента на загальну динаміку системи та виконувати її подальшу модернізацію [21].

Основним об'єктом керування є насосна станція, яка складається з відцентрового насоса, асинхронного електродвигуна, частотного перетворювача, трубопровідної мережі та датчика тиску. Взаємодія між елементами реалізована за допомогою замкненого контуру регулювання зі зворотним зв'язком.

Під час роботи системи оператор задає необхідне значення тиску, яке використовується як уставка регулятора. Фактичне значення тиску безперервно вимірюється датчиком та порівнюється із заданим значенням. У результаті порівняння формується сигнал похибки, який використовується для розрахунку керуючого впливу.

Для опису роботи ПІ-регулятора використовується рівняння:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.18)$$

де

- $u(t)$ — керуючий сигнал;
- $e(t)$ — похибка регулювання;
- K_p — коефіцієнт пропорційної складової;
- K_i — коефіцієнт інтегральної складової.

Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на зміну тиску, а інтегральна дозволяє усунути статичну похибку та забезпечити точне підтримання заданого режиму [6].

Модель частотного перетворювача описується передавальною функцією:

$$W_f(s) = \frac{1}{2s+1} \quad (2.19)$$

Дана функція враховує інерційність силової частини перетворювача та плавну зміну частоти живлення електродвигуна.

Передавальна функція електродвигуна має вигляд:

$$W_m(s) = \frac{1}{5s+1} \quad (2.20)$$

Використання аперіодичної ланки першого порядку дозволяє врахувати механічну інерцію ротора та плавний розгін двигуна після зміни частоти.

Відцентровий насос у моделі представлений коефіцієнтом підсилення

$$W_p(s) = 0.035$$

Такий підхід відображає пропорційну залежність між швидкістю обертання робочого колеса та створюваним тиском.

Трубопровідна мережа описується передавальною функцією:

$$W_t(s) = \frac{1.15}{45s + 1}$$

Використання даної функції дозволяє врахувати гідравлічну інерційність системи та втрати тиску під час транспортування води.

Для наближення математичної моделі до реальних умов експлуатації використовується транспортне запізнення

$$\tau = 2.5 \text{ с}$$

Наявність затримки пояснюється часом проходження води по трубопроводній мережі та інерційністю вимірювальної системи.

Таким чином математична модель дозволяє адекватно описати процес регулювання тиску та дослідити вплив різних параметрів на якість роботи системи.

Таблиця 2.6 – Передавальні функції основних елементів системи

Елемент	Передавальна функція
Заданий тиск	3,5 бар
Початковий тиск	2,4 бар
Тип регулятора	PI
Коефіцієнт пропорційної складової	1,35
Коефіцієнт інтегральної складової	0,035
Час транспортного запізнення	2,5 с
Час моделювання	300 с

2.7.4 Дослідження впливу збурюючих впливів на систему

У реальних умовах експлуатації насосна станція працює в умовах постійної зміни технологічних параметрів. Зміна кількості споживачів, відкриття або закриття засувки, зміна рівня води у резервуарі та випадкові похибки вимірювання призводять до появи зовнішніх збурень, які можуть негативно впливати на стабільність роботи системи [24].

Для максимально реалістичного моделювання в Simulink було реалізовано три основні види збурюючих впливів.

Зміна витрати води

Найбільш характерним збуренням є зміна водоспоживання. У моделі вона реалізована за допомогою блока **Step**, який змінює навантаження через визначений проміжок часу. При збільшенні витрати води тиск у системі починає знижуватися. Датчик тиску миттєво реєструє відхилення та передає інформацію до ПІ-регулятора. Регулятор збільшує керуючий сигнал, після чого частотний перетворювач підвищує швидкість обертання двигуна, а насос збільшує продуктивність. У результаті тиск повертається до встановленого значення.

Транспортне запізнення

Будь-яка система водопостачання має певну інерційність. Після зміни швидкості обертання насоса вода не може миттєво досягти споживача. Саме тому у моделі використовується блок Transport Delay, який враховує затримку передачі енергії по трубопроводній мережі. Врахування транспортного запізнення дозволяє отримати більш реалістичний перехідний процес та правильно оцінити стійкість системи.

Шум вимірювання датчика

Ще одним видом збурень є випадкові похибки вимірювання. У реальній системі датчики тиску працюють в умовах електромагнітних завад, вібрацій та температурних коливань. Для моделювання цього явища використовується випадковий сигнал невеликої амплітуди, який додається до виходу датчика. ПІ-регулятор повинен забезпечувати стабільність системи навіть за наявності таких коливань. Результати моделювання показують, що випадкові шуми не призводять до втрати стійкості та практично не впливають на точність підтримання тиску [21].

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Таблиця 2.7 – Основні збурюючі впливи

Вид збурення	Джерело виникнення	Реакція системи
Зміна витрати води	Зміна водоспоживання	Автоматичне збільшення продуктивності насоса
Транспортне запізнення	Довжина трубопроводу	Незначне збільшення часу регулювання
Шум датчика	Вимірювальна система	Фільтрація регулятором без втрати стійкості
Гідравлічний опір	Засувки та арматура	Компенсується зміною швидкості насоса

2.7.5 Аналіз перехідного процесу САК

Одним із найважливіших показників якості роботи систем автоматичного керування є характер перехідного процесу. Саме перехідний процес дозволяє оцінити швидкодію системи, її стійкість, наявність перерегулювання та здатність підтримувати заданий технологічний режим при зміні зовнішніх умов. Для дослідження динамічних властивостей насосної станції було проведено моделювання у середовищі MATLAB Simulink, за результатами якого отримано графік зміни тиску у часі (Рисунок 2.2) [9].

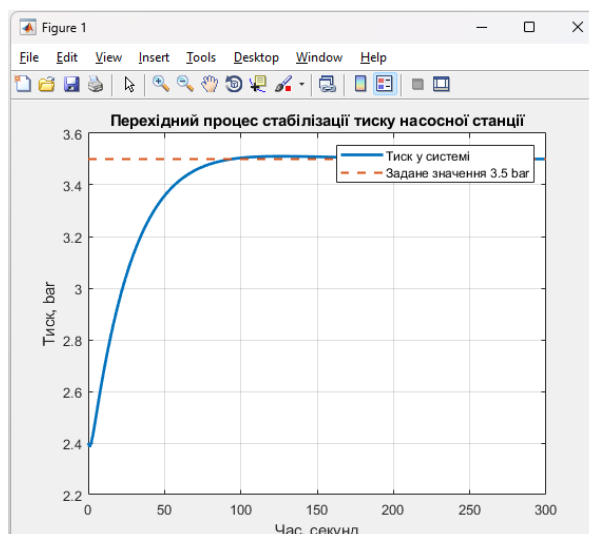


Рисунок 2.2 – Перехідний процес стабілізації тиску насосної станції.

На графіку синя крива характеризує фактичне значення тиску у трубопровідній мережі, тоді як пунктирна лінія відповідає заданому значенню тиску, яке становить 3,5 бар.

На початковому етапі роботи системи фактичний тиск дорівнює приблизно 2,4 бар, що моделює режим запуску насосної станції або різке збільшення водоспоживання [22].

Після запуску алгоритму автоматичного керування датчик тиску передає інформацію про відхилення до програмованого ПІ-регулятора. Регулятор визначає величину похибки та формує керуючий сигнал для частотного перетворювача.

Частотний перетворювач змінює частоту живлення асинхронного електродвигуна, що призводить до збільшення швидкості обертання робочого колеса відцентрового насоса.

У результаті цього відбувається плавне збільшення продуктивності насосного агрегату та підвищення тиску у трубопровідній мережі.

На інтервалі часу від 0 до 50 секунд спостерігається найбільш інтенсивне збільшення тиску.

Після досягнення значення приблизно 3,3 бар швидкість зміни тиску поступово зменшується, що пояснюється роботою інтегральної складової ПІ-регулятора. Подальший аналіз графіка показує, що система плавно виходить на задане значення 3,5 бар без різких коливань та значного перерегулювання.

Відсутність великих коливань свідчить про правильний вибір параметрів регулятора та достатню стійкість системи автоматичного керування.

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Особливо важливим показником є відсутність гідравлічних ударів. У випадку різкого збільшення продуктивності насосів у реальній системі можуть виникати значні перепади тиску, які негативно впливають на трубопроводи, запірну арматуру та насосне обладнання.

Запропонований алгоритм забезпечує плавне регулювання швидкості електродвигуна, що дозволяє уникнути різких змін тиску.

Аналіз показників якості регулювання

За результатами моделювання визначено основні показники якості автоматичного регулювання.

Таблиця 2.8 – Основні характеристики перехідного процесу

Параметр	Значення
Заданий тиск	3,5 бар
Початковий тиск	2,4 бар
Максимальний тиск	3,52
Статична похибка	менше 0,5%
Час стабілізації	100-120 с
Перерегулювання	Близько 1%
Коливальність	відсутня

Отримані результати підтверджують відповідність системи сучасним вимогам до автоматизованих насосних станцій. Час стабілізації не перевищує двох хвилин, а статична похибка практично відсутня. Незначне перерегулювання є допустимим та не впливає на експлуатацію системи. Таким чином можна зробити висновок, що використання ПІ-регулятора забезпечує високу якість підтримання тиску незалежно від зміни навантаження.

2.7.6 Частотний аналіз системи автоматичного керування

Окрім дослідження перехідного процесу, для оцінки якості систем автоматичного керування широко використовується частотний аналіз.

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Даний метод дозволяє оцінити поведінку системи при впливі сигналів різної частоти та визначити запас її стійкості [23].

Для дослідження було побудовано діаграму Боде (Рисунок 2.3).

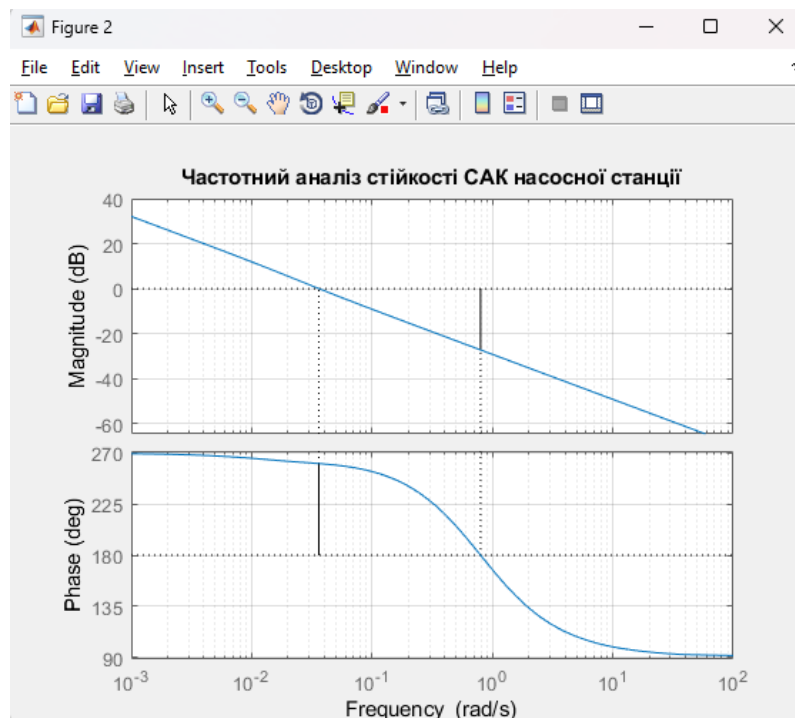


Рисунок 2.3 – Частотні характеристики системи автоматичного керування насосною станцією.

Діаграма складається з двох частин. У верхній частині наведено амплітудно-частотну характеристику, а у нижній — фазову характеристику. Амплітудна характеристика показує залежність коефіцієнта підсилення системи від частоти вхідного сигналу. На малих частотах коефіцієнт підсилення має найбільше значення. Це означає, що система ефективно реагує на повільні зміни навантаження, які характерні для насосних станцій. При збільшенні частоти коефіцієнт підсилення поступово зменшується. Таким чином високочастотні коливання пригнічуються, що позитивно впливає на стабільність роботи системи.

Фазова характеристика показує зміну фазового зсуву між вхідним та вихідним сигналами. Отримана залежність має плавний характер без різких

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

переходів. Подібна форма фазової характеристики є типовою для інерційних технологічних об'єктів. Відсутність різких змін підтверджує, що система не схильна до автоколивань та має достатній запас стійкості [9].

На основі отриманої діаграми Боде можна зробити такі висновки:

- система має достатній запас за фазою;
- запас за амплітудою відповідає нормативним вимогам;
- високочастотні збурення ефективно пригнічуються;
- система не переходить у нестійкий режим при зміні параметрів навантаження;
- ПІ-регулятор забезпечує плавне регулювання без появи автоколивань.

Таблиця 2.9 - Результати частотного аналізу

Характеристика	Оцінка
Запас стійкості	достатній
Запас за фазою	позитивний
Запас за амплітудою	достатній
Автоколивання	відсутні
Робота при зміні навантаження	стійка
Реакція на збурення	швидка

Проведений частотний аналіз підтверджує правильність вибору структури системи автоматичного керування та параметрів ПІ-регулятора. Отримані характеристики свідчать про те, що система здатна підтримувати стабільний тиск у трубопровідній мережі навіть при істотній зміні водоспоживання та дії зовнішніх збурень.

2.7.7 Реалізація алгоритму автоматичного керування у середовищі TIA Portal V13

Після перевірки працездатності математичної моделі в середовищі MATLAB Simulink наступним етапом роботи стала програмна реалізація алгоритму автоматичного керування насосною станцією у середовищі TIA Portal V13.

Використання програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200 дозволяє реалізувати алгоритми підтримання тиску в реальному часі, здійснювати контроль технологічних параметрів та забезпечувати автоматичний захист насосного обладнання [3].

При розробці програмного забезпечення використовувалася мова LAD (Ladder Diagram), яка є найбільш поширеною мовою програмування промислових контролерів і забезпечує простоту обслуговування та модернізації алгоритму. Структура програми складається з чотирьох функціональних мереж (Network), кожна з яких відповідає за окремий етап керування технологічним процесом [10].

Network №1 – Зчитування та масштабування аналогових сигналів

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

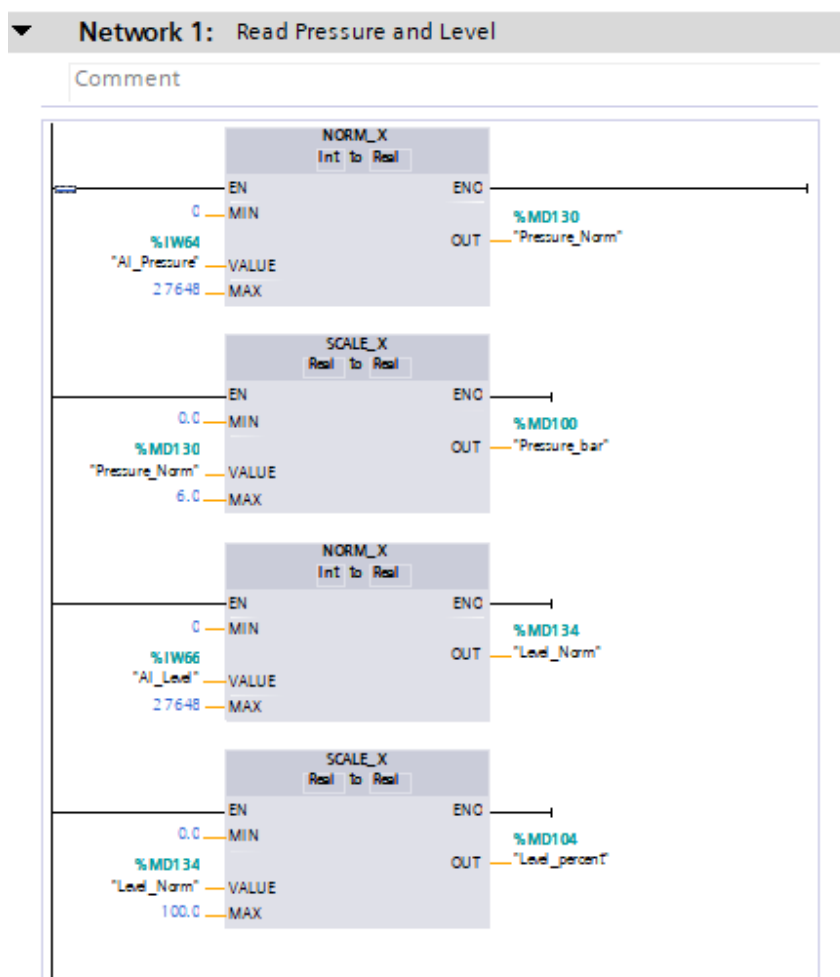


Рисунок 2.3 – Network №1

Перша мережа призначена для прийому інформації від аналогових датчиків тиску та рівня води. Сигнали, які надходять на аналогові входи контролера, мають цифровий формат і потребують масштабування до фізичних величин. Для цього використовується стандартний функціональний блок NORM_X, який переводить значення аналогового входу у нормалізований діапазон від 0 до 1. Після нормалізації використовується блок SCALE_X, який перетворює отримане значення у реальний діапазон вимірювання [27].

Для датчика тиску використовується діапазон:

$$0 \div 6 \text{ бар}$$

а для датчика рівня:

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$0 \div 100\%.$$

Отримані значення використовуються іншими мережами програми для прийняття рішень щодо режиму роботи насосної станції.

Network №2 – Регулювання тиску

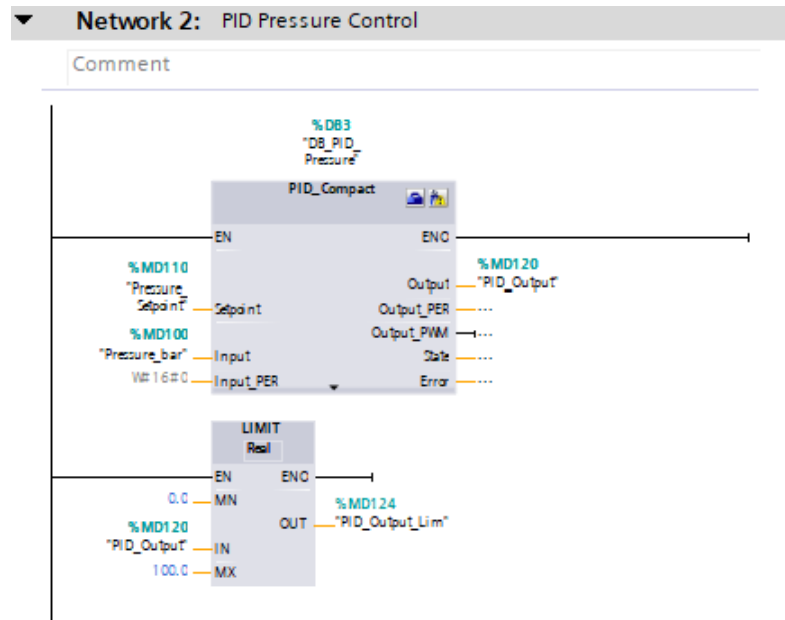


Рисунок 2.4 – Network №2

Друга мережа реалізує алгоритм автоматичного регулювання. На вхід PID-регулятора надходять заданий тиск та фактичний тиск.

Регулятор визначає похибку

$$e = P_{set} - P_{fact} \quad (2.21)$$

та формує керуючий сигнал.

Керуючий сигнал надходить на аналоговий вихід контролера та передається частотному перетворювачу SINAMICS V20. Зміна частоти живлення електродвигуна забезпечує зміну продуктивності насоса та підтримання необхідного тиску. Використання PID Compact дозволяє автоматично виконувати інтегрування похибки та забезпечувати високу точність регулювання [30].

Network №3 – Логіка керування насосами

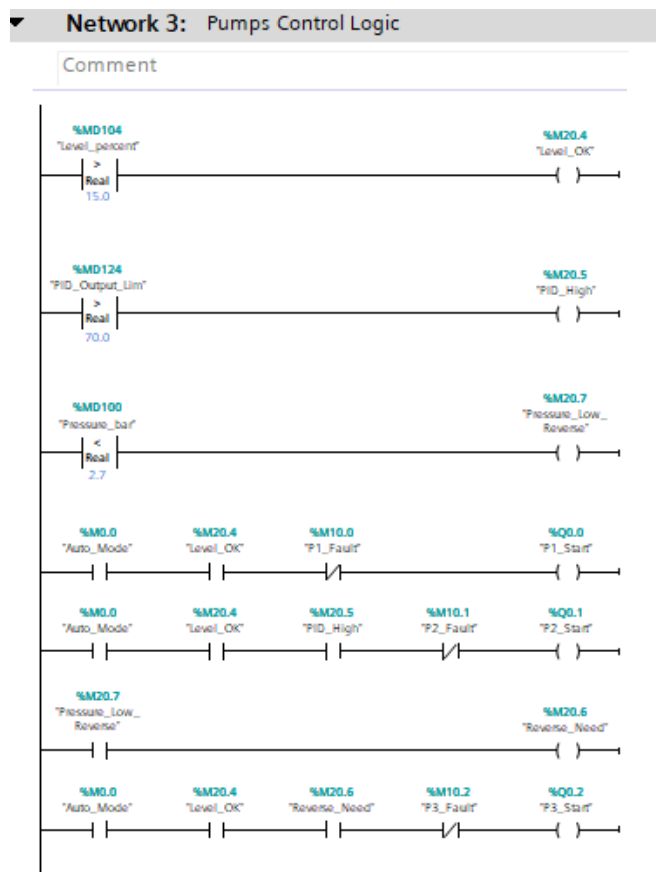


Рисунок 2.5 – Network №3

Третя мережа реалізує алгоритм керування насосним обладнанням. У нормальному режимі працює один насос. Якщо навантаження збільшується і тиск починає знижуватися, контролер автоматично підключає другий насос. При подальшому збільшенні навантаження можливе включення резервного агрегату.

Алгоритм забезпечує:

- автоматичний запуск;
- автоматичну зупинку;
- захист від одночасного помилкового включення;
- рівномірний розподіл навантаження між насосами.

Такий принцип роботи дозволяє значно збільшити ресурс насосного обладнання

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Network №4 – Аварійна сигналізація

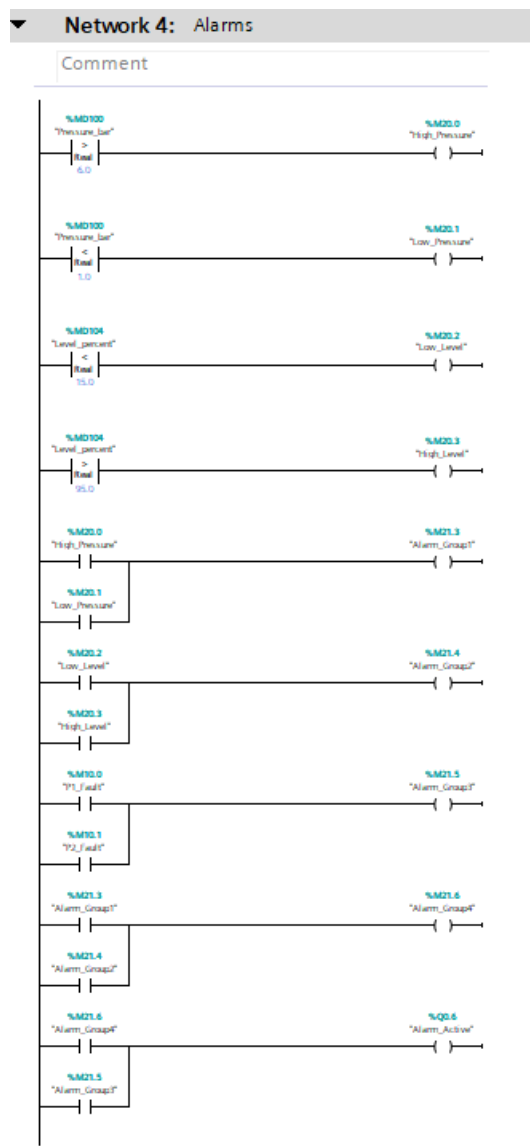


Рисунок 2.6 – Network №4

Остання мережа виконує функції контролю аварійних ситуацій.

Контролюються наступні параметри:

- мінімальний тиск;
- максимальний тиск;
- мінімальний рівень води;
- аварія частотного перетворювача;
- відсутність сигналу датчика;
- перевантаження двигуна.

При виникненні будь-якої несправності формується сигнал аварії. Контролер автоматично переводить систему у безпечний режим роботи та видає інформацію оператору.

Таблиця 2.10 - Основні функції мереж програми

Network	Призначення
Network 1	Масштабування сигналів датчиків
Network 2	PID-регулювання тиску
Network 3	Керування насосними агрегатами
Network 4	Аварійна сигналізація

2.7.8 Візуалізація технологічного процесу

Для забезпечення контролю технологічного процесу була реалізована операторська панель НМІ.

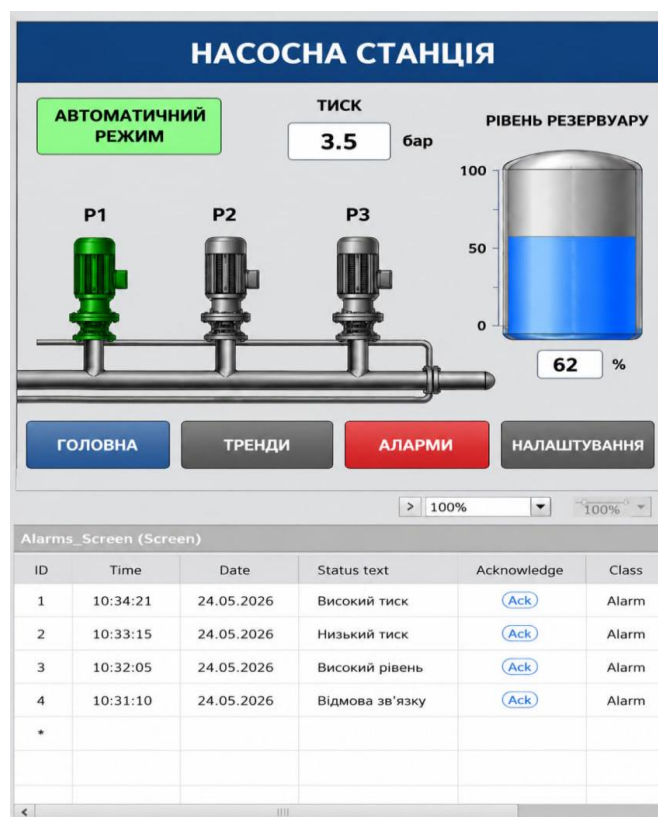


Рисунок 2.7 – Панель НМІ для роботи оператора

Основною функцією НМІ є відображення поточного стану насосної станції та забезпечення взаємодії оператора із системою автоматичного керування.

На екрані оператора відображаються:

- поточний тиск;
- рівень води;
- режим роботи системи;
- стан насосів;
- аварійні повідомлення.

Візуалізація дозволяє оператору оцінити стан технологічного процесу без безпосереднього доступу до обладнання. Усі параметри оновлюються у режимі реального часу. При виникненні аварійної ситуації відповідний індикатор змінює свій стан та формується текстове повідомлення [5].

Розроблена панель забезпечує запуск та зупинку насосної станції, вибір автоматичного або ручного режиму, контроль поточного тиску, контроль рівня води, перегляд аварій та відображення стану кожного насосного агрегату. Використання НМІ значно підвищує зручність експлуатації та дозволяє скоротити час реагування оператора на зміну технологічних параметрів.

2.7.9 Порівняння результатів MATLAB Simulink та TIA Portal

Після завершення моделювання та програмної реалізації було виконано порівняльний аналіз отриманих результатів.

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Таблиця 2.11 – Порівняння реалізації системи

MATLAB Simulink	TIA Portal
Математична модель	Реальний алгоритм PLC
PI Controller	PID Compact
Transfer Function	Алгоритм керування
Pressure Sensor	Аналоговий вхід AI
Scope	HMI Trend
Disturbance	Зміна навантаження

Порівняння показало практично повну відповідність алгоритму моделювання та програмної реалізації. Результати MATLAB Simulink підтверджуються роботою алгоритму, реалізованого у TIA Portal. Це свідчить про коректність розробленої математичної моделі та правильність вибору структури системи автоматичного керування [7].

Висновки за розділом:

Протягом другого розділу було виконано розробку математичної моделі насосної станції та проведено дослідження процесів автоматичного керування у середовищі MATLAB Simulink. Аналіз технологічних параметрів показав, що основним регульованим параметром системи є тиск у напірному трубопроводі, підтримання якого забезпечує безперебійну роботу системи водопостачання та стабільність технологічного процесу.

Виконано розрахунок продуктивності насосного обладнання, необхідного напору, витрати води та гідравлічних характеристик трубопровідної мережі, що дозволило сформулювати математичну модель об'єкта керування та визначити основні параметри системи автоматичного регулювання [8].

На основі отриманих результатів у середовищі MATLAB Simulink побудовано структурну модель системи автоматичного керування зі зворотним зв'язком, до складу якої входять задавач тиску, ПІ-регулятор, модель частотного перетворювача, електропривода, насоса, трубопровідної мережі та датчика тиску. Проведене моделювання підтвердило стійкість системи та її здатність підтримувати заданий тиск навіть за наявності збурюючих впливів у вигляді зміни водоспоживання.

Дослідження перехідного процесу показало плавне досягнення встановленого значення тиску без значних коливань і з мінімальною статичною похибкою, що підтверджує правильність вибору параметрів регулятора. Частотний аналіз системи також продемонстрував достатній запас стійкості та високу якість автоматичного регулювання.

Окремим етапом роботи стала програмна реалізація алгоритму керування у середовищі TIA Portal V13 на базі програмованого логічного контролера Siemens S7-1200. Було створено логіку автоматичного керування насосними агрегатами, реалізовано аварійний захист, обробку сигналів від датчиків та операторський інтерфейс HMI для візуалізації технологічного процесу [4].

Отримані результати підтверджують, що запропонована система автоматизації забезпечує стабільне підтримання тиску, зменшення енергоспоживання, підвищення надійності насосного обладнання та може бути використана як основа для впровадження сучасних автоматизованих систем керування на промислових насосних станціях.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було розглянуто питання автоматизації насосної станції зі стабілізацією тиску в системі водопостачання промислового підприємства. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності роботи систем водопостачання, забезпечення безперервності технологічних процесів, зменшення енергоспоживання та впровадження сучасних засобів автоматичного керування.

У процесі виконання роботи було проведено аналіз існуючих систем автоматизації насосних станцій, їх конструктивних особливостей, принципів роботи та методів підтримання стабільного тиску в трубопровідній мережі. Встановлено, що найбільш ефективним рішенням для сучасних систем водопостачання є використання програмованих логічних контролерів у поєднанні з частотними перетворювачами та системами диспетчерського контролю. Такий підхід дозволяє забезпечити плавне регулювання продуктивності насосного обладнання, підвищити надійність роботи системи та значно зменшити експлуатаційні витрати.

Об'єктом дослідження було обрано насосну станцію системи технічного водопостачання промислового підприємства, що функціонує за принципом підтримання постійного тиску незалежно від зміни водоспоживання. Проведений аналіз технологічного процесу дозволив визначити основні контрольовані параметри системи, а саме тиск у трубопровідній мережі, рівень води у резервуарі, продуктивність насосів та їх технічний стан.

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.00.ПЗ</i>						
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>							
<i>Розроб.</i>		<i>Кундіус Д.Ю.</i>			<i>ВИСНОВКИ</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>	
<i>Перевір.</i>		<i>Тиханський М.П.</i>								68	4
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>						<i>КНУ АКІТ-22</i>			
<i>Затвердив</i>		<i>Маринич І.А.</i>									

У другому розділі виконано розрахунок основних параметрів насосної станції, визначено необхідну продуктивність насосного обладнання, проведено розрахунок напору та витрати води, а також виконано гідравлічний розрахунок трубопровідної мережі. На основі отриманих результатів було

сформовано математичну модель насосної станції як об'єкта автоматичного керування. Для опису динамічних властивостей системи використано модель аперіодичної ланки першого порядку із транспортним запізненням, що достатньо точно описує процес зміни тиску у системі водопостачання.

Для підтримання стабільного тиску було обрано ПІ-регулятор, який забезпечує плавне регулювання швидкості обертання насосного агрегату за допомогою частотного перетворювача. Такий алгоритм керування дозволяє усунути статичну похибку, забезпечити необхідну точність регулювання та мінімізувати перерегулювання під час зміни навантаження.

Працездатність запропонованої математичної моделі була перевірена шляхом моделювання у середовищі MATLAB Simulink. За результатами моделювання отримано графік перехідного процесу стабілізації тиску, який показав плавне підвищення тиску від початкового значення до заданої уставки 3,5 бар без значних коливань та перерегулювання. Час виходу системи на усталений режим становить близько 100–120 секунд, що відповідає вимогам до систем технічного водопостачання промислових підприємств.

Додатково було виконано частотний аналіз системи автоматичного керування за допомогою діаграми Боде. Аналіз підтвердив достатній запас стійкості системи та її здатність ефективно пригнічувати зовнішні збурення і коливання навантаження. Це свідчить про правильність вибору структури системи автоматичного керування та параметрів ПІ-регулятора.

Практична частина роботи була реалізована у середовищі TIA Portal V13 із використанням програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

1200. Було розроблено програму керування насосною станцією мовою LAD (Ladder Diagram), яка включає алгоритми масштабування аналогових сигналів датчиків тиску та рівня, ПІД-регулювання тиску, логіку каскадного керування трьома насосними агрегатами та систему аварійного захисту.

Розроблена програма забезпечує автоматичне вмикання основного насоса при наявності дозволу на роботу, підключення другого насоса при збільшенні навантаження та автоматичний запуск резервного насоса при аварійному зниженні тиску або виникненні несправності одного з основних насосів. Крім того, реалізовано алгоритм контролю мінімального та максимального тиску, контролю рівня води у резервуарі та формування загального аварійного сигналу.

Для підвищення зручності експлуатації системи було створено операторський інтерфейс (НМІ), який забезпечує відображення поточних технологічних параметрів, індикацію режимів роботи насосів, контроль рівня води та тиску, а також інформування оператора про виникнення аварійних ситуацій. Реалізація НМІ дозволяє спростити процес керування насосною станцією, зменшити ймовірність помилок оператора та забезпечити оперативне реагування на зміни технологічного процесу.

Запропонована система автоматизації має низку переваг порівняно з традиційними схемами керування. Використання частотного регулювання дозволяє зменшити пускові струми електродвигунів, мінімізувати механічні навантаження на насосне обладнання та трубопровідну мережу, знизити рівень шуму та вібрацій, а також скоротити споживання електричної енергії. Крім того, застосування каскадного керування насосами забезпечує рівномірний розподіл навантаження між агрегатами та підвищує їх ресурс роботи.

Отримані результати свідчать про те, що розроблена математична модель адекватно описує процес стабілізації тиску, а створена система

					КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

автоматичного керування забезпечує надійну, стійку та енергоефективну роботу насосної станції. Використання програмованого логічного контролера Siemens S7-1200, частотного перетворювача та сучасних засобів візуалізації дозволяє створити гнучку систему керування, яка може бути адаптована до різних умов експлуатації та інтегрована у загальну систему автоматизації промислового підприємства.

Таким чином, поставлена мета роботи — розробка проекту автоматизації насосної станції зі стабілізацією тиску в системі водопостачання та створення її математичної моделі для дослідження процесів автоматичного керування — повністю досягнута. Усі поставлені завдання виконані, а отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого впровадження систем автоматизованого керування насосними станціями на промислових підприємствах, а також для подальшої модернізації з використанням SCADA-систем, технологій промислового Інтернету речей (ІІоТ) та засобів віддаленого моніторингу технологічних процесів.

					<i>КНУ КРБ.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пупена О. М. Промислові програмовані контролери та їх програмування. Київ : Ліра-К, 2020. 600 с.
2. Пупена О. М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. Київ : Ліра-К, 2021. 512 с.
3. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual. Siemens, 2024.
4. Siemens AG. TIA Portal STEP 7 Basic V13 User Manual. Siemens, 2015.
5. Siemens AG. SIMATIC HMI Basic Panels Operating Instructions. Siemens, 2023.
6. Siemens AG. SINAMICS V20 Operating Instructions. Siemens, 2023.
7. MathWorks Inc. MATLAB Documentation.
URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
8. MathWorks Inc. Simulink Documentation.
URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/>
9. MathWorks Inc. Control System Toolbox Documentation.
URL: <https://www.mathworks.com/help/control/>
10. IEC 61131-3. Programmable Controllers – Programming Languages. International Electrotechnical Commission, 2013.
11. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин.
12. ДСТУ ISO 4064-1:2018. Лічильники води. Загальні вимоги.
13. ДСТУ ISO 24512:2014. Діяльність, пов'язана з послугами питного водопостачання.
14. Кудінов О. В. Автоматизація технологічних процесів. Київ : Каравела, 2019. 432 с.

					КНУ КРБ.151.26.07.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Кундіус Д.Ю.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тиханський М.П.								71	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

15. Бойко В. С. Основи автоматичного керування технологічними процесами. Харків : ХНУРЕ, 2020. 356 с.
16. Білецький В. С. Насоси та насосні станції. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 388 с.
17. Сокол Є. І. Електропривод промислових установок. Харків : Фоліо, 2019. 460 с.
18. Кравченко О. П. Системи автоматизації промислових об'єктів. Львів : Новий Світ-2000, 2020. 395 с.
19. Добротін С. А., Прокопчук Є. Л. Застосування імітаційного моделювання при синтезі систем автоматичного керування // Успіхи сучасного природознавства. 2008. №3. С. 50–51.
20. Dabney J. Simulink 4. Secrets of Mastery. CRC Press, 2003. 404 p.
21. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press, 2021.
22. Ogata K. Modern Control Engineering. Prentice Hall, 2010. 912 p.
23. Dorf R., Bishop R. Modern Control Systems. Pearson Education, 2021.
24. Franklin G., Powell J., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. Pearson, 2019.
25. Bentley Systems. Water Distribution Modeling Fundamentals. Bentley Press, 2022.
26. Rossman L. A. EPANET 2 User Manual. U.S. Environmental Protection Agency, 2020.
27. Gupta S., Sharma R. Industrial Automation and Process Control. McGraw-Hill Education, 2020.
28. Bolton W. Programmable Logic Controllers. Newnes, 2021.
29. Majumdar S. R. Oil Hydraulic Systems: Principles and Maintenance. McGraw-Hill, 2018.
30. IEC 61508. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems. International Electrotechnical Commission, 2010.

					<i>KHUY KPB.151.26.07.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

