

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка системи керування автоматизованим електроприводом насосної станції побутового водопостачання

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група ЕТмз-22-1

  
Підпис

Зелений Р.М.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

доц. Горяченко С.Л.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

доц. Тимошук О.Г.  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

27.12.23р  
Підпис, дата

Зав. кафедри МАЕЕС

Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

24 12 2023 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури \_\_\_\_\_  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень магістр  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр і назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр і назва

Спеціалізація \_\_\_\_\_  
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_.201\_\_\_\_

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Зелений Руслан Миколайович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка системи керування автоматизованим електроприводом насосної станції побутового водопостачання  
керівник роботи Горященко С.Л., к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 18 08 2023 р. № 30

2. Строк подання студентом роботи на кафедру \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Напруга 220/380 В, потужність до 4.5 кВт.

Керування – частотне, кількість електродвигунів – 3 \_\_\_\_\_

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд існуючих насосних станцій та методів їх керування. 2. Моделювання системи автоматизованого керування електроприводом насосної станції

3. Розробка блоку автоматизованого керування електроприводом насосної станції

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

Електричні схеми керування МРМА 23.00.00.00 ДО1, Схеми підключення частотного перетворювача МРМА 23.03.00.00 ЕЗ, Керування електроприводом системи насосів МРМА 23.00.00.00 ЕЗ, Розрахункова схема насосної станції МРМА 23.00.00.00 РР, Режими роботи та налаштування блоку системи керування електроприводом МРМА 23.00.00.00 ДІ1, Блок системи керування електроприводом насосної станції МРМА 23.00.00.00 ДІ2, Блок системи керування електроприводом МРМА 23.00.00.00 ВЗ, Варіант виконання насосної станції та системи її керування МРМА 23.00.00.00 ДІЗ

23.00.00.00 ДІЗ



# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Зелений Руслан Миколайович

2. Тема магістерської роботи; Розробка системи керування автоматизованим електроприводом насосної станції побутового водопостачання

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 88

5. Автоматизовані системи керування також спрямовані на забезпечення енергоефективності. Вони можуть регулювати роботу насосів в залежності від напіру, виключати непотрібні устаткування та оптимізувати графіки роботи для мінімізації споживання електроенергії. В роботі було проведено необхідний аналіз систем водопостачання. Розглянуто методи керування насосними станціями, схеми підключення. Обрана схема насосної станції, що містить три асинхронних двигуна. Відповідно до цього було обрано частотний перетворювач, що може бути запрограмовано програмою керування. Підібрані елементи блоку керування, розроблено електричну схему блоку керування. Створено модель блоку керування електроприводом у програмному середовищі SolidWorks а також модель самої насосної станції. Розроблений блок керування електроприводом може виявляти витoki та автоматично вимикати подачу води, а також сприяти раціональному використанню ресурсів. Розроблений пристрій є частиною насосної станції, яка подає охолоджену воду у водопровідну мережу житлового комплексу.

Підпис студента 

"15" 12 2023 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 152 від "27" 12 2023 р.

Оцінка проекту ЕК Відмінно 50/100  
Рекомендації ЕК \_\_\_\_\_

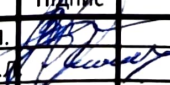
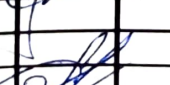

Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар 

"27" 12 2023 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	стр 5
1. Огляд існуючих насосних станцій та методів їх керування.....	11
1.1 Насосний агрегат.....	13
1.2 Регулювання режиму роботи насосного агрегату.....	14
1.3 Аналітичний огляд методів керування насосними станціями...	21
1.4 Висновок до першого розділу.....	31
2. Моделювання системи автоматизованого керування електроприводом насосної станції.....	32
2.1 Створення моделі насосної станції.....	32
2.2 Визначення напрямку моделювання насосної станції.....	35
2.3 Методологія розробки системи керування насосами.....	38
2.4 Математичне модель.....	42
2.5 Висновки до другого розділу.....	53
3. Проектування блоку автоматизованого керування електроприводом насосної станції.....	54
3.1 Аналіз роботи насосної станції.....	54
3.2 Вибір елементів насосної станції.....	56
3.3 Розробка блоку системи керування електроприводом.....	60
3.4 Монтаж блоку керування на насосній станції.....	76
3.5 Висновки до третього розділу.....	78
Висновки.....	79
Перелік джерел посилань.....	81
Додатки.....	86

<b>МРМА 23.00.00.000ПЗ</b>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис
Розроб.		Зелений Р. М.	
Перев.		Горященко С. Д.	
Н. контр.			
Затв.		Поліщук О. С.	
Розробка системи керування автоматизованим електроприводом насосної станції побутового водопостачання			
		Літ.	Аркуш
		М	4
		Аркушів	
		88	
ХНУ, гр. ЕТМЗ-22-1			

## ВСТУП

Різке зростання цін на енергоносії та ресурси призвів до непропорційного збільшення частки енергетичних витрат у загальних витратах виробництва. Через війну багато промислових і комунальних підприємств ставлять завдання зниження енерго- і ресурсоемності своєї продукції та послуг, тобто. завдання енергозбереження. Аналіз енергоспоживання на багатьох підприємствах показує, що розв'язання цієї проблеми передбачає проведення організаційно-технічних заходів, вкладених у ліквідацію нераціонального споживання енергоресурсів, і впровадження менш витратних технологій. Можна виділити два напрямки: впровадження енергоефективних технологій та енергозберігаючого обладнання, які дозволяють виконати той самий обсяг робіт з меншими витратами енергії.

Електроприводи є енергетичною базою сучасного виробництва і, в свою чергу, промислові електроприводи - це переважно електроприводи з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, на які припадає до 50% енергії, що споживається електроприводами. Завдяки своїй простоті та відносно низькій вартості ці електроприводи широко використовуються в різноманітних механізмах. Вони мають загальновідомі недоліки, такі як складність запуску при підключенні безпосередньо до електромережі, низька експлуатаційна надійність через струм, що протікає в шість-сім разів вище, і труднощі в регулюванні частоти обертання.

Типовими сферами застосування асинхронних двигунів є насосні станції холодного та гарячого водопостачання, каналізаційні насосні станції та системи опалення. Механізми цього типу споживають щонайменше 20-25% від загального обсягу електроенергії.

Якщо поглянути на муніципальне водне господарство, то фактичний рівень споживання електроенергії далекий від адекватного. Зростання цін на

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електроенергію змушує нас звернути увагу на фактичне споживання електроенергії електродвигунами насосних агрегатів.

Надмірне споживання електроенергії є наслідком низької ефективності насосних агрегатів та систем водопостачання в цілому.

У більшості випадків електроприводи цих механізмів не регулюються, а тому не можуть забезпечувати розумне енергоспоживання та витрати при зміні технічних потреб у широкому діапазоні. Ці механізми, вибрані на основі максимальної продуктивності, в більшості випадків експлуатуються на низькій потужності, що визначається змінами напіру в різні періоди.

Впровадження систем автоматичного управління технологічними процесами на виробництві якісно змінює форму і характер праці, підвищуючи безпеку, кваліфікацію і знання працівників, стираючи межі між фізичною і розумовою працею.

Метою є розробка блоку керування електроприводом відцентрових насосів з використанням сучасної елементної бази, що має відповідати наступним вимогам:

- Економія електроенергії;
- Гнучка конфігурація приводу при мінливих умовах експлуатації;

Для вирішення поставленої задачі необхідно:

- ознайомитись з процесами та технологією водопостачання;
- провести аналітичний огляд технічної літератури з даного питання;
- провести техніко-економічне обґрунтування обраного принципу керування;
- вибрати елементи електроприводу, які будуть гарантувати працездатність системи;
- вибрати елементи електроприводу, які будуть гарантувати працездатність системи;
- підготувати функціональну схему системи автоматичного керування;
- виконати математичний опис об'єкта та системи керування;

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблений блок керування є частиною насосної станції, яка подає охолоджену воду у водопровідну мережу житлового комплексу.

Разом з системою моніторингу та керування, розподільчим пристроєм, частотним перетворювачем частоти та станцією керування утворюється пристрій плавного пуску насосної станції.

Використання керованих асинхронних електроприводів для керування насосним агрегатом забезпечує:

- плавний пуск електродвигуна;
- усунення механічного навантаження на електродвигун;
- усунення стрибків струму в мережі;
- відсутність гідравлічних ударів;
- ефективне використання споживаної насосною установкою потужності у всьому діапазоні регулювання;
- коефіцієнт потужності електродвигуна насоса близький до 1;
- знижений рівень шуму під час запуску та роботи;
- автономна та безпечна робота; інтеграція в системи керування технологічними процесами.

Проектований насосний агрегат повинен відповідати наступним технічним характеристикам:

- Номінальна подача води 115 м<sup>3</sup>/год;
- Максимальний напір 65 м.

Електропривод відцентрового насоса, що розглядається, повинен відповідати наступним вимогам:

- напір в системі водопостачання повинен підтримуватися постійним з точністю не менше 1% і при необхідності регулюватися вручну;
- Відповідно до технологічного процесу, вимога до відновлення тиску при подачі навантаження повинна бути в межах 2 с;
- забезпечення режиму плавного пуску протягом 1-5 секунд від задатчика інтенсивності;

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- захист від несприятливих режимів роботи насосної станції;
- захист від короткого замикання;
- Захист від перевантаження по струму;
- захист від перегріву обмоток двигуна;
- захист від обриву та зсуву фаз;
- захист електронасосного агрегату від роботи в кавітаційному режимі;
- індикація на передній панелі "Мережа" "Робота" "Несправність";
- вибір режиму роботи "Ручний" / "Автоматичний";
- диспетчеризація: "Несправність" ("Сухий" контакт) для кожного електронасоса;
- привід повинен бути нереверсивним;
- живлення агрегату здійснюється від трифазної мережі змінного струму 380/220, 50 Гц;
- при регулюванні частоти обертання повинен бути забезпечений максимальний економічний режим.

Підхід до проектування системи керування насосним агрегатом, силовим агрегатом і приводом в цілому повинен відповідати світовим тенденціям розвитку електроприводів [1].

Для виконання завдання керування насосним агрегатом електропривод повинен забезпечувати:

- автоматичне і ручне керування пуском-зупинкою насосного агрегату;
- автоматичну зміну частоти обертання валу електродвигуна для підтримки постійного тиску в мережі споживача;
- аварійне відключення насоса при надходженні сигналу тривоги від датчика (при відхиленні параметра від допустимих технічних меж);
- захист електродвигуна від аварійного режиму роботи.
- аварійний запуск резервного насоса; автоматичний поперемінний режим роботи насоса;
- самозапуск після перепаду напруги.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система автоматичного керування насосним агрегатом повинна забезпечувати наступні показники якості керування:

- статична похибка в сталому режимі роботи - 0.

Перехідні характеристики повинні відповідати наступним вимогам:

- перерегулювання при пуску не повинно перевищувати 5%;
- перерегулювання при скиданні або відключенні навантаження не повинно перевищувати 10%.

При проектуванні АСУ ТП повинні бути передбачені заходи щодо забезпечення безпеки при монтажі, експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті технічних засобів відповідно до чинних в Україні нормативних документів: "Гігієнічні норми проектування промислових підприємств"; "Правила улаштування електроустановок», "Пожежна автоматика в будинках і спорудах», «Система стандартів безпеки праці (ССБП)", "Виробничі приміщення. Загальні вимоги безпеки" [1].

Усі зовнішні елементи технічних засобів АСУ ТП, що знаходяться під напругою, повинні бути захищені від дотику.

Доступ до обертових частин насосного агрегату повинен бути обмежений.

Електричні елементи повинні бути захисно заземлені. Оскільки вони працюють у житлових районах, необхідно вжити заходів для обмеження рівня виробничого шуму та передбачити засоби пожежогашіння.

Ергономічні та техніко-естетичні вимоги забезпечуються розміщенням насосного агрегату в добре освітленому та опалювальному приміщенні, а також у місці, зручному для обслуговування технічним персоналом.

Конструкція і розташування панелей і пультів управління повинні забезпечувати доступність для огляду і зручність обслуговування.

Вимоги до експлуатації, технічного обслуговування та ремонту компонентів системи.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Насосні агрегати повинні встановлюватися в закритому приміщенні, захищеному від атмосферних опадів, на спеціальних фундаментах, так як вони призначені для житлових комплексів.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ТА МЕТОДІВ ЇХ КЕРУВАННЯ

Насосні станції в житлових будинках є ключовою частиною систем водопостачання та водовідведення. Вони забезпечують ефективне функціонування системи, збільшуючи тиск води та оптимізуючи відведення стічних вод. У відповідь на зростаючі вимоги до комфорту та якості водопостачання, на ринку з'являються нові технології та рішення [2].

Центробежні насоси. Забезпечують велику продуктивність та ефективність. Їх використовують для підняття води на велику висоту.

Погружні насоси. Розташовані в колодязях або сховищах для забору глибоких підземних вод.

Системи автоматичного управління. Деякі насосні станції оснащені сучасними системами автоматизації, що регулюють роботу насосів в залежності від потреби.

Шум та вартість експлуатації знижені на звукоізольованих насосних станціях. Важливо враховувати рівень шуму, особливо при розташуванні станції в невеликому будинку.

Енергоефективність важлива і тому є моделі з енергозберігаючими технологіями для зменшення вартості експлуатації. Енергоефективність та сталість розвитку дозволила створити насосні станції з інтегрованими енергоефективними технологіями. Розроблені матеріали, що запобігають корозії та забезпечують тривалу службу.

Інтеграція з системами "розумного дому" для забезпечення дистанційного моніторингу та управління.

Зростаючає інтерес до насосних станцій, які сприяють збереженню води та зменшенню впливу на навколишнє середовище.

Насосна станція (НС) - це електрогідродинамічний технологічний комплекс, що складається з споруд і пристроїв, які перетворюють електричну

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергію в механічну енергію потоку рідини і керують цим процесом перетворення [1].

Залежно від призначення НС можуть бути наступних типів: постачання побутової води населеним пунктам і промисловим підприємствам; постачання оборотної води промисловим підприємствам; постачання води для систем каналізації, тепlopостачання, дренажу та пожежогасіння; меліорація; перекачування нафти.

Залежно від способу об'єднання насосів, аварійні ситуації можна розділити на два типи: аварійні ситуації з насосами, що працюють окремо, та аварійні ситуації з насосами, що працюють разом. Перший випадок характерний для НС з низькою індивідуальною продуктивністю насосів і низькими вимогами до надійності. Це, наприклад, дренажні насоси. Спільна робота насосів широко використовується у всіх типах НС. Для забезпечення необхідних технічних характеристик агрегати з'єднують паралельно, послідовно або комбіновано. Найбільш типовим є паралельне з'єднання насосів, яке використовується в більшості типів НС. Послідовне з'єднання використовується, коли в системі необхідно створити достатньо високий тиск, наприклад, при перекачуванні в'язких розчинів (нафта, шлам і т.д.).

Залежно від основних регульованих параметрів НС поділяються на станції регулювання тиску та станції регулювання витрати.

Виходячи з вимог до надійності подачі робочої рідини до технологічного обладнання, НР поділяються на категорії 1, 2 і 3 [2].

Серед перерахованих вище типів НС найбільш поширеними є НС з паралельним підключенням насосів, що застосовуються в системах оборотного водопостачання водопровідно-каналізаційних систем населених пунктів, промислових підприємств і технічних комплексів виробничих об'єктів, в тому числі підприємств кольорової металургії та нафтопереробних заводів.

На рисунку 1.1 показана технологічна схема типової насосної станції.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

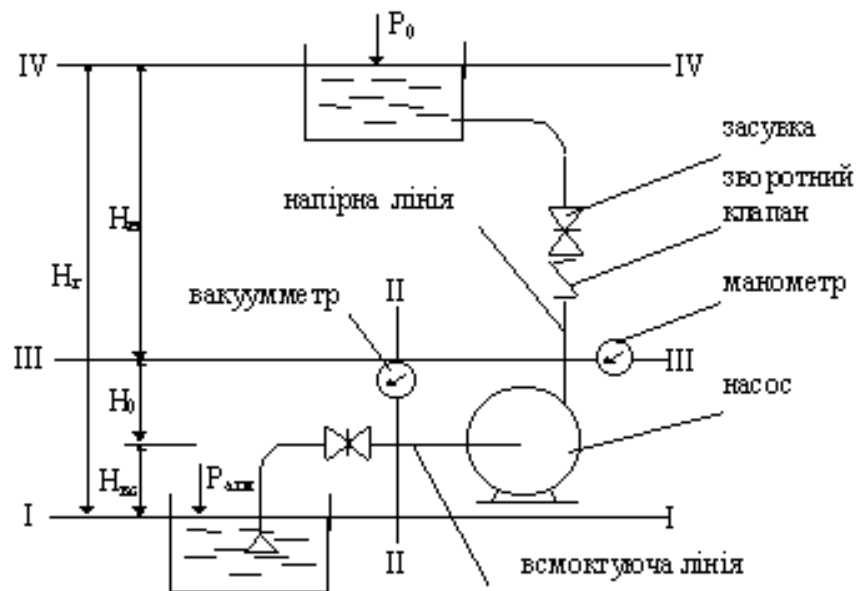


Рисунок 1.1 - Технологічна схема типової насосної станції

Рідина надходить у вхідний колектор НС і накопичується в резервуарі. З вхідного резервуару вона перекачується насосом до вихідного колектора КНС, а потім до магістрального трубопроводу, звідки розподіляється споживачам або надходить на вхід наступної КНС. Для відокремлення насоса від трубопроводу на вхідному та вихідному патрубках насоса встановлюються клапани. Крім того, на виході з насоса встановлюються клапани запобігання зворотному потоку, щоб запобігти зворотному руху рідини через насос. Для приводу насоса і клапана використовується електродвигун.

### 1.1 Насосний агрегат

Основним силовим елементом НС є насосний агрегат, який включає в себе один або декілька насосів, всмоктувальні та нагнітальні трубопроводи, запірну арматуру, електроприводи та датчики технологічних параметрів системи. В якості основного силового агрегату НС використовується об'ємний або динамічний насос [1].

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

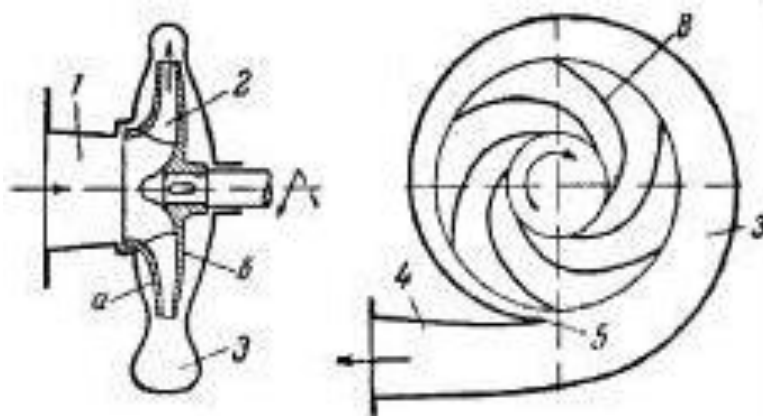


Рисунок 1.2 - Принципова схема відцентрового насоса: а - передній диск, б – задній диск, в – лопаті, 1 – підвід, 2 – робоче колесо, 3 – відвід, 4 – прямовісний дифузор, 5 – язик

Об'ємні насоси працюють за принципом витіснення, коли тиск рідини, що транспортується, підвищується в результаті стиснення. Розрізняють насоси поршневі (мембранні, поршневі) і ротаційні (аксіально-поршневі, радіально-поршневі, золотникові, шестеренні, гвинтові та ін.).

Динамічні насоси працюють за принципом сильного імпульсу на рухоме середовище. До них відносяться лопатеві і фрикційні (вихрові, дискові, струменеві та ін.) турбокомпресори. Відцентрові насоси є найбільш поширеним типом.

Основною характеристикою НС є те, що вихідна витрата і тиск рідини залежать від часу і вхідної витрати, а також від ряду збурюючих впливів. Ці залежності відображають зміни в режимі роботи НС.

## 1.2 Регулювання режиму роботи насосного агрегату

Для забезпечення заданого режиму роботи НС в умовах експлуатації, що змінюються, необхідно відрегулювати режим роботи насосного агрегату. Це завдання можна розділити на два напрямки: регулювання гідравлічного режиму роботи насоса і регулювання енергоефективності електроприводу НС.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для відцентрових насосних агрегатів для регулювання витрати і тиску рідини застосовуються такі методи:

- 1) дроселювання трубопроводу;
- 2) перепуск частини потоку рідини з виходу насоса на вхід;
- 3) відключенням або підключенням насоса (ступінчасте регулювання);
- 4) зміна частоти обертання робочого колеса насоса.

Дроселювання трубопроводу є дуже поширеним методом регулювання тиску і витрати рідини. При цьому регулюючим елементом є механічний пристрій у вигляді засувки, дросельного клапана, шибера, засувки, діафрагми тощо, який встановлюється на напірному трубопроводі насоса і змінює прохідний перетин трубопроводу шляхом його переміщення [1].

Незважаючи на простоту реалізації цього способу регулювання, він має низку недоліків. Одним з них є знижена ефективність НС, особливо при регулюванні глибоких дебітів. Це пов'язано з тим, що енергія, яка витрачається на подолання додаткового опору регулюючого пристрою, перетворюється на теплові втрати, що визначає низьку енергоефективність цього методу. Крім того, при закритому клапані збільшується тиск на виході насоса, що скорочує термін служби ущільнень і запірних пристроїв і збільшує витік рідини через шви і зазори. Ще одним недоліком цього методу є можливість однозонного регулювання, що знижує подачу або напір насосного агрегату.

Байпасне регулювання напору засноване на перенаправленні частини потоку рідини з виходу насоса на вхід насоса через клапан. У цьому випадку енергія, що витрачається на циркуляцію рідини по колу холостого ходу, не виробляє корисної роботи, що знижує ефективність установки, особливо коли потрібне глибоке регулювання. Як і в попередньому методі, витрата теплоносія регулюється тільки в бік зменшення [1, 2].

Ступінчасте регулювання витрати насосної станції досягається підключенням або відключенням насоса або групи насосів. Цей метод характеризується простотою експлуатації, оскільки не потребує додаткових

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулюючих пристроїв. Однак, відсутність безперервного якісного підтримання тиску при змінному споживанні рідини і частих запусках двигунів скорочує термін служби обладнання і вимагає будівництва проміжних резервуарів для вирівнювання коливань в аварійному постачанні рідини. Крім того, знижується загальна ефективність НС, оскільки електропривод не працює в оптимальному режимі.

Ці особливості призводять до зниження швидкості приводу (ПП), для якого використовуються описані вище методи управління.

Змінюючи частоту обертання робочого колеса насосного агрегату, можна безперервно регулювати продуктивність НС з меншими витратами енергії, ніж раніше [2]. Однак це вимагає великих витрат на обладнання для керування, особливо на обладнання з потужністю вище середньої, і призводить до поганої електромагнітної сумісності з мережею електропостачання. Однак цей метод є найбільш перспективним у зв'язку зі зниженням вартості регульованих електроприводів.

Можна комбінувати кілька методів керування. Одним з широко використовуваних варіантів керування є поєднання ступеневого регулювання зі зміною частоти обертання робочого колеса насосного агрегату, що досягається за допомогою частотно-регульованих електроприводів. Згідно з рекомендацією [3], один насосний агрегат у групі з двох-трьох робочих агрегатів повинен бути обладнаний регульованим електроприводом.

Для регулювання енергоефективності установки НС необхідно підібрати оптимальний режим роботи насосів з точки зору їх енергоспоживання при спільній роботі. Одне з рішень цієї проблеми представлено в літературі [5-7].

Відповідно до вимог, насосні станції будь-якого призначення в принципі повинні бути спроектовані так, щоб ними можна було керувати без присутності обслуговуючого персоналу: автоматично - за технологічними параметрами (рівень води в резервуарі, тиск або витрата води в мережі); дистанційно (телемеханічно) - з диспетчерського пункту, локальне - персоналом, який

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулярно приходять для передачі необхідних сигналів на пункт управління або до місця дислокації обслуговуючого персоналу.

Керування регульованим електроприводом повинно бути автоматичним, в першу чергу, за тиском в зазначеній точці мережі, витратою води, що подається в мережу, і рівнем води в баку.

НС повинена забезпечувати функції вимірювання для контролю тиску в напірних лініях і кожного насосного агрегату, витрати води в напірних лініях, рівнів води в дренажному напрямку і вакуумному котлі, температури підшипників агрегату (за необхідності) і рівня аварійного затоплення (вода в машинному відділенні на рівні фундаменту електроприводу). Якщо насосний агрегат має потужність 100 кВт або більше, необхідно регулярно вимірювати ефективність з похибкою не менше 3%.

Метою визначення базової лінії для різних конфігурацій НС є визначення важливих аспектів, які необхідно враховувати при проектуванні систем керування НС, таких як розмір НС та інвестиційні витрати, оцінені відповідно до схеми. Типи НС для мережі водопостачання можна розділити на три різні типи в залежності від джерела всмоктування. До них відносяться: насосні станції з резервуаром, свердловинні насосні станції та бустерні насосні станції.

Насосна станція з резервуаром складається з одного насоса або декількох паралельно з'єднаних насосів, які всмоктують воду з резервуара і подають її у водонапірний бак або безпосередньо в мережу. Як правило, насоси цього типу працюють з примусовим всмоктуванням (тобто рівень води в резервуарі вищий, ніж на всмоктувальному патрубку насоса). У цьому випадку найчастіше використовуються горизонтальні відцентрові насоси. Однак бувають також випадки, коли НС працює з негативним всмоктуванням (тобто рівень води в резервуарі нижче всмоктувального отвору насоса). У цьому випадку можуть використовуватися вертикальні насоси або насоси з занурювальними двигунами. Умови експлуатації для цього обмежуються наступним чином: вони обмежені максимальним і мінімальним рівнем води в джерелі води (резервуарі)

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і характеристичною кривою системи. Наприклад, якщо система подається в накопичувальний бак, НС повинна працювати відповідно до максимального і мінімального рівнів води в баку. Якщо джерелом подачі є мережа, насос повинен працювати відповідно до графіку споживання і необхідного напору; бустерні насоси використовуються для підвищення тиску в системі за допомогою насоса, що забирається з джерела подачі, що вже знаходиться під тиском (наприклад, з водопроводу). Пристрій складається з одного насоса або групи паралельно з'єднаних насосів, які живляться від загальної лінії під тиском (див. рис. 1.3). Відгалуження кожного насоса під'єднані до загальної розподільчої труби.

Зрештою, вода подається до місця призначення (наприклад, до водопроводу або резервуару). У будь-якому випадку, умови роботи бустера залежать від заданої кривої системи; інша конфігурація бустерів НС - гідропневматичний бак. У цій конфігурації НС підтримує заданий тиск (максимальний і мінімальний тиск) за допомогою гідропневматичного бака, розташованого на початку імпульсної лінії (див. рис. 1.3). Однак гідропневматичний бак використовується лише для невеликих потоків напіру (наприклад, внутрішньобудинкове водопостачання).

Схема розташування акумулюючих та підвищувальних баків є схожою. Різниця між цими типами НС полягає у джерелі всмоктування НС (з бака або з напірного трубопроводу). Схема установки цих насосних станцій, що розглядаються в цій роботі (див. рис. 1.3. і 1.4), складається з секційних вентилів на всмоктувальному трубопроводі. Кожне відгалуження насоса має секційний клапан після насоса, за яким слідує секційний клапан і зворотний клапан. Ці відгалуження підключені до загальної імпульсної лінії. В кінці цієї лінії будуть встановлені секційні клапани, щоб в кінцевому підсумку подати воду до місця призначення. Базова схема НС включає три різні довжини трубопроводу, які визначають розмір станції. Довжина L1 становить між кожною паралельною

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гілкою насоса.  $L_2$  відповідає довжині гілок насосів. Нарешті,  $L_3$  відповідає довжині всмоктувальної та імпульсної магістралей [3].

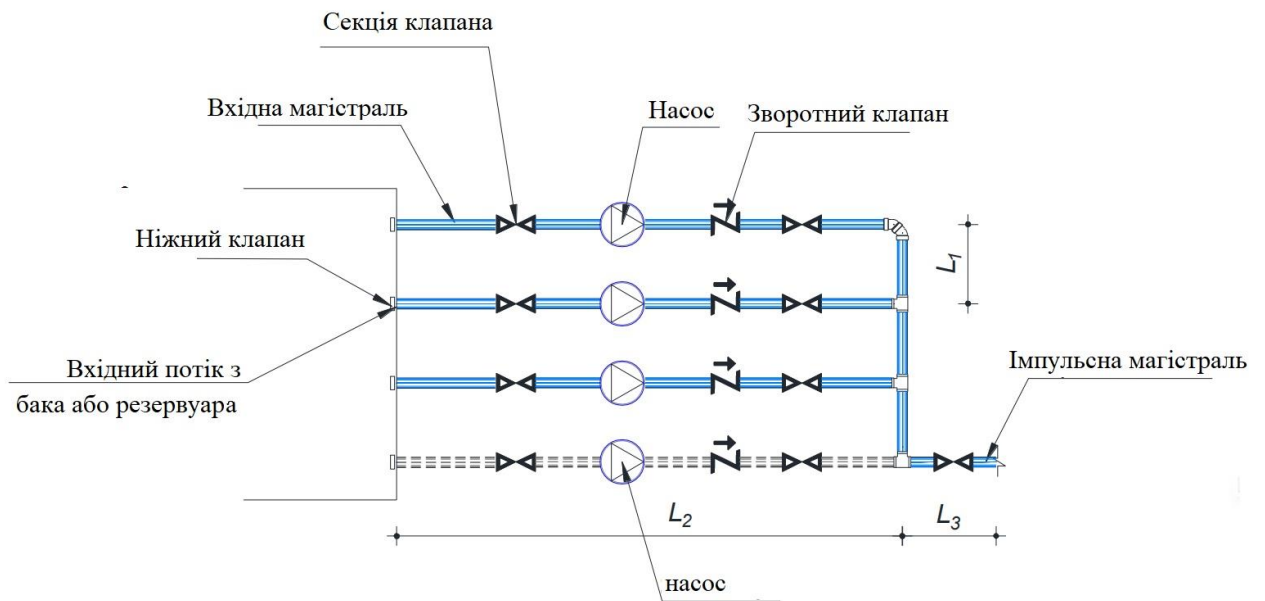


Рисунок 1.3 - Схема установки насосних станцій [3]

Принципова схема монтажу свердловинної НС (див. рис. 1.5 і рис. 1.6) складається з насоса із зануреним у воду свердловини двигуном. Насос всмоктує колодязну воду безпосередньо через занурений всмоктувальний отвір.

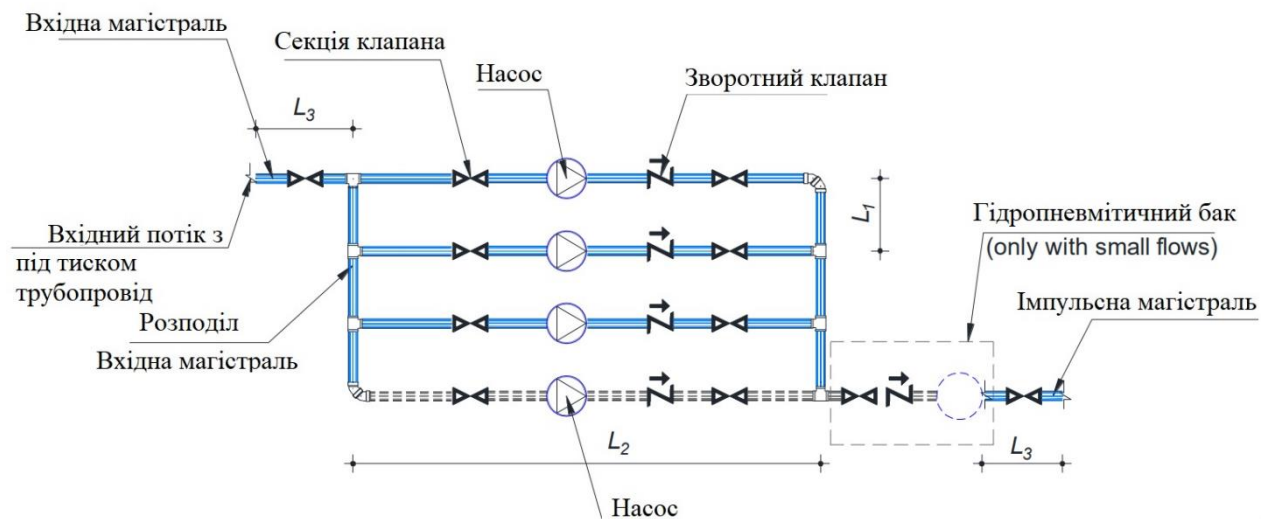


Рисунок 1.4 - Схема установки насосних станцій [3]

Вертикальний зворотний клапан встановлюється безпосередньо перед вертикальним заглибним насосом. Повітряний клапан встановлений у верхній частині імпульсної магістралі (тобто над рівнем землі). Коли насос запускається, вода тече з високою швидкістю, оскільки загальний динамічний напір спочатку дорівнює нулю. Тому важливо, щоб повітря виходило повільно, щоб стовп води у свердловині надто м'яко вдаряв по зворотному клапану та нерухомому стовпу води в імпульсній магістралі, щоб уникнути надмірного стрибка тиску. Після повітряного клапана в горизонтальній імпульсній магістралі встановлено горизонтальний зворотний клапан і секційний клапан. Однак іноді зворотний клапан встановлюється після всмоктувальної решітки у вертикальній імпульсній магістралі. Нарешті, імпульсна магістраль кожного свердловинного насоса приєднується до загальної магістралі, яка подає воду в систему. Довжина L1 – це відгалуження кожного свердловинного насоса, L2 – основна розподільна магістраль, а L3 – імпульсна магістраль до місця призначення.

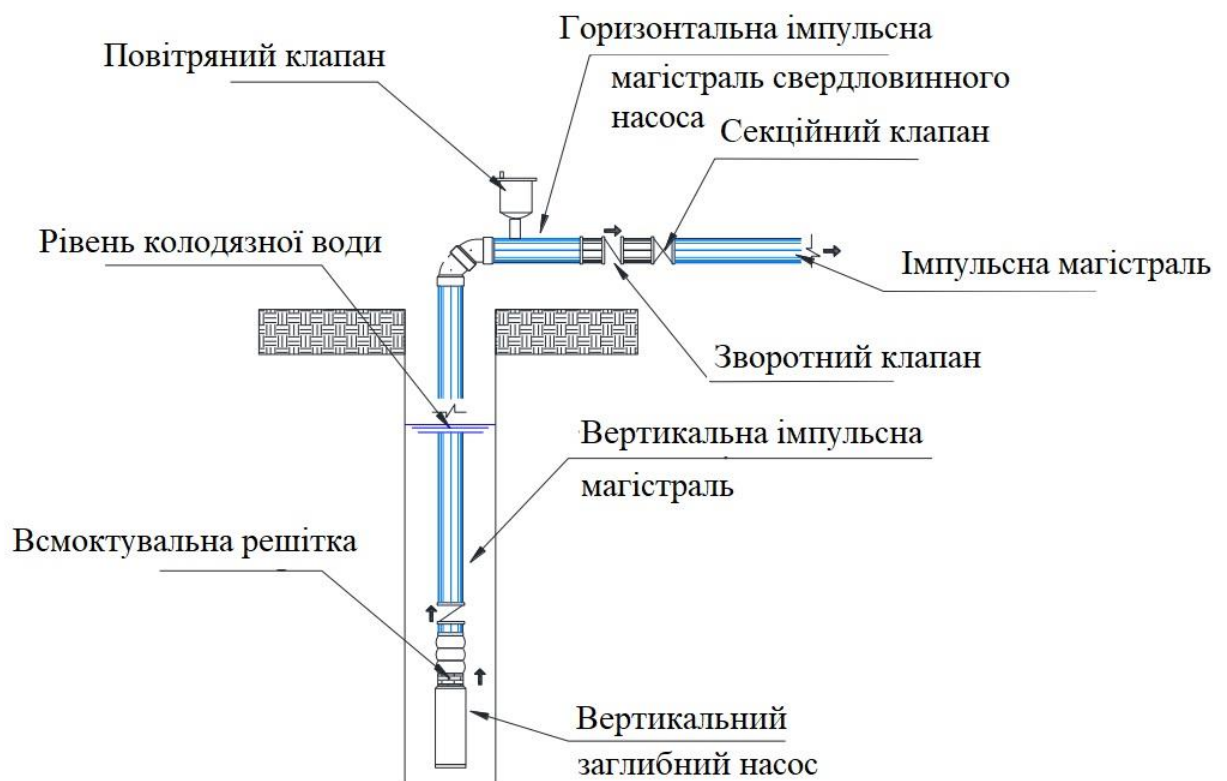


Рисунок 1.5 - Принципова схема насосної станції водопостачання [3]

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

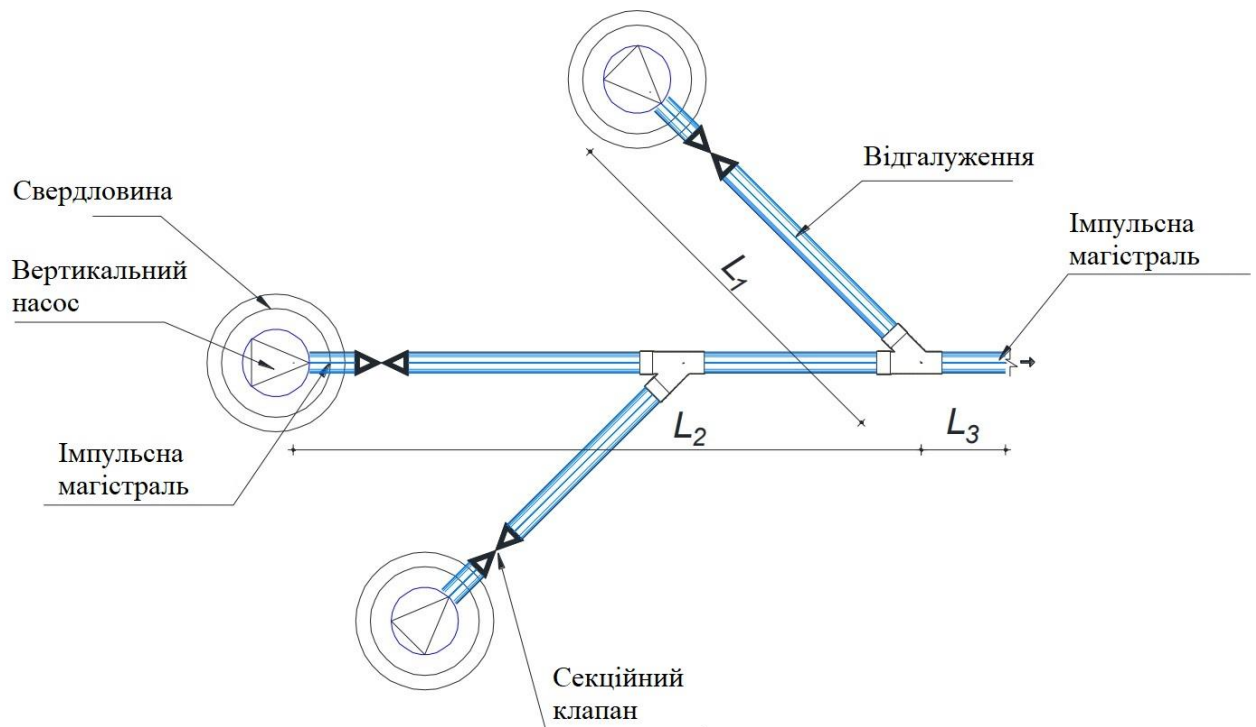


Рисунок 1.6 - Базова схема насосної станції водопостачання [3]

Вода, що всмоктується з резервуару або магістралі під тиском, було наведено як приклад для пояснення розробленої методології проектування НС. Однак цю методологію можна застосовувати в різних типах конфігурації НС для мереж водопостачання. Фактично, одна з цілей цієї роботи полягає в тому, щоб методологія проектування НС була стандартизована для будь-якої конфігурації НС для мережі водопостачання, зменшуючи рівень суб'єктивності, який може мати розробник.

### 1.3 Аналітичний огляд методів керування насосними станціями

Потік насоса можна регулювати трьома різними способами

- дроселювання за допомогою клапанів;
- періодичне регулювання (пуск-зупинка);

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- регулювання швидкості насоса за допомогою частотно-регульованих приводів.

На промислових підприємствах дроселювання за допомогою клапанів є найпоширенішим методом. Це досягається шляхом встановлення різних заслінок на нагнітальному трубопроводі. Ефективність дросельного регулювання набагато гірша, ніж регулювання швидкості, яке часто дозволяє заощадити більше 50% енергії. Цей метод використовується для установок малої потужності і характеризується невеликим діапазоном регулювання. Перевагою є те, що його легко реалізувати.

Насоси на станціях водопостачання та водоочисних станціях регулюються за допомогою переривчастого методу керування. Недоліками цього методу є низький ККД, часті пуски і зупинки негативно впливають на трубопроводи та обладнання, а також неможливість плавного регулювання. При використанні цього методу регулювання необхідно передбачити запас потужності для двигуна. Перевага полягає в тому, що ефективність значно вища, оскільки немає додаткових втрат при регулюванні потоку.

Регулювання швидкості забезпечує точне і плавне керування. Використання регулювання швидкості зменшує навантаження на трубопроводи і клапани, збільшуючи термін їх служби і зменшуючи потребу в технічному обслуговуванні [4].

На відміну від прямого запуску, двигуни насосів, керовані частотним перетворювачем, отримують лише частину пускового струму від мережі. Це означає, що габаритні розміри електрообладнання можуть бути зменшені, а витрати на придбання - знижені. Використання приводів з частотними перетворювачами дозволяє зменшити розмір двигуна на 10-20%.

Зменшується статичне навантаження на трубопровід, оскільки система весь час працює під високим тиском. Тиск підтримується на заданому рівні.

Динамічні навантаження значно знижуються при плавному регулюванні в порівнянні з переривчастим регулюванням. Усуваються гідравлічні удари, які

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зношують трубопроводи та обладнання. Термін служби обладнання може бути навіть подвоєний.

Регулювання за допомогою зміни швидкості обертання дозволяє економити електроенергію [3, 4].

Виходячи з вищесказаного, регулювання шляхом зміни частоти обертання насоса є методом вибору для регулювання тиску.

Через особливості своєї конструкції та технологічні умови відцентрові механізми не потребують реверсування, а їх швидкість обертання відповідає частоті обертання двигуна, тому електропривод для цих установок є безредукторним і, як правило, постачається в комплекті з механізмом.

Особливістю розглянутої групи механізмів є те, що вони легко запускаються. Зазвичай ці механізми запускаються як у стані холостого ходу після аварійної зупинки, так і в нормальному стані. При цьому контактний момент поглинається на рівні 30-35% від номінального. В установках вентиляторного типу, які запускаються під навантаженням, момент опору плавно зростає зі збільшенням швидкості і вигідно відповідає формі механічної характеристики асинхронного двигуна. Як наслідок, прямий пуск досліджуваного механізму асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором або синхронними двигунами з асинхронними пусковими обмотками відбувається під дією динамічного моменту, який майже не змінюється. Ці особливості відцентрових механізмів дозволяють в більшості випадків використовувати для їх приводу некеровані асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. В установках більшої потужності рекомендується використовувати синхронні двигуни. Використання синхронних двигунів може позитивно вплинути на реактивну потужність, що споживається промисловими підприємствами з мережі.

У деяких великих установках сумарний момент інерції електроприводу значно перевищує момент інерції двигуна. У цьому випадку прямий пуск затримується і пов'язаний зі значним нагріванням обмоток асинхронного

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

короткозамкненого або синхронного двигуна. Тому для електроприводу цих установок використовують асинхронні двигуни з фазними роторами, навіть якщо не потрібне регулювання швидкості. Реостатний спосіб запуску таких двигунів полегшує процес запуску обладнання та зменшує пусковий струм і нагрівання обмоток двигуна.

Багато насосних агрегатів працюють в умовах високої температури, вологості та вибухонебезпечного середовища. У таких умовах переважно використовуються закриті асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Для особливо суворих умов експлуатації доступні спеціально розроблені двигуни.

В установках, що вимагають плавного і автоматичного регулювання потоку, застосовують регульовані електроприводи. Характеристики відцентрових механізмів створюють сприятливі умови для роботи регульованих електроприводів, як з точки зору статичного навантаження, так і необхідного діапазону регулювання швидкості. Механічні характеристики показують, що зі зменшенням швидкості крутний момент на валу двигуна також зменшується щонайменше в чотири рази. Це полегшує охолодження двигуна під час роботи в режимі гальмування. Необхідний діапазон регулювання частоти обертання за відсутності статичного підйому  $N_{st} = 0$  не перевищує заданого діапазону зміни подачі [5].

В середньому для регульованих механізмів відцентрового типу необхідний діапазон регулювання швидкості зазвичай не перевищує 2:1. Завдяки характеристикам цих механізмів і невисоким вимогам до жорсткості механічних властивостей можна успішно використовувати прості варіанти реалізації регульованих асинхронних електроприводів [5-7].

Розглянемо основні варіанти регульованих електроприводів, що застосовуються.

Функціональна схема двохтрансформаторного асинхронного частотнорегульованого електропривода насоса з високовольтним двигуном й

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низьковольтним АІН в системі стабілізації тиску в гідравлічній мережі представлена на рис. 1.7. [8]

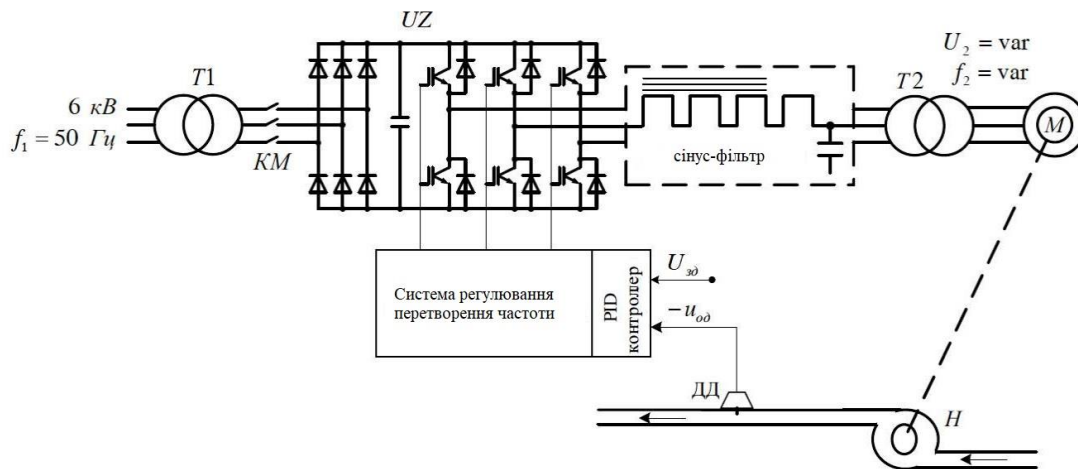


Рисунок 1.7 – Функціональна схема двохтрансформаторного асинхронного частотно-регульованого електропривода насоса з високовольтним двигуном й низьковольтним АІН в системі стабілізації тиску в гідравлічній мережі

Позначення й назва елементів: Т1 – понижуючий трансформатор 6/0,4; КМ – контактор підключення всієї системи електроприводу; UZ – низьковольтний перетворювач частоти з ланкою постійного струму на базі транзисторних IGBT – модулів за схемою АІН; Т2 – підвищувальний трансформатор 0,4/6; М – асинхронний короткозамкнений двигун; Н – насосна установка; ДД – датчик тиску.

Функціональна схема безтрансформаторного високовольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода насосної установки з АІС в системі стабілізації тиску в гідравлічній мережі представлена на рис. 1.8.

Позначення й назва елементів: UZ – високовольтний перетворювач частоти з ланкою постійного струму; 59 БУВ – блок управління випрямлячем (на звичайних тиристорах); БУАІС – блок управління автономним інвертором струму АІС (на базі ГТОтиристорів); М – високовольтний асинхронний короткозамкнений двигун; Н – насосна установка; ДД – датчик тиску.

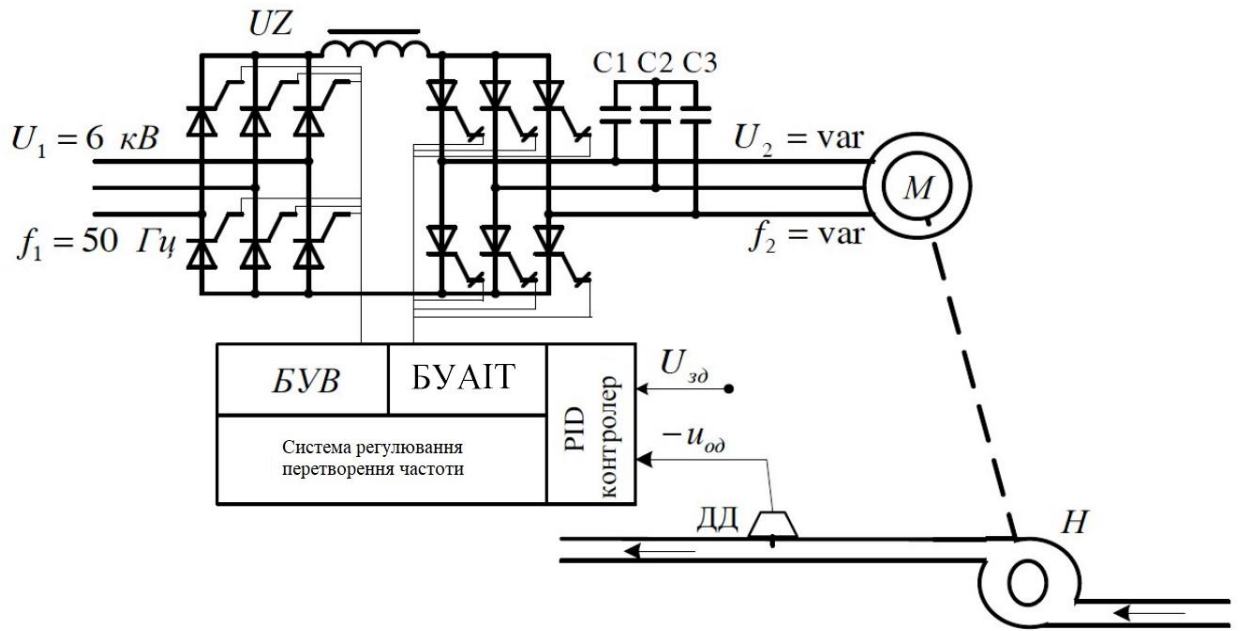


Рисунок 1.8 – Функціональна схема безтрансформаторного високовольтного асинхронного частотно-регульованого електропривода насосної установки з АІС в системі стабілізації тиску в гідравлічній мережі [8]

Функціональна схема низьковольтного асинхронного частотнорегульованого електропривода насосної установки з АІН в системі автоматичної стабілізації рівня рідини наведена на рис. 1.9

Позначення й назва елементів: UZ – низьковольтний перетворювач частоти з ланкою постійного струму; М – високовольтний асинхронний короткозамкнений двигун; Н – насосна установка; Q – приток рідини; ПР – перетворювач рівня рідини в резервуарі

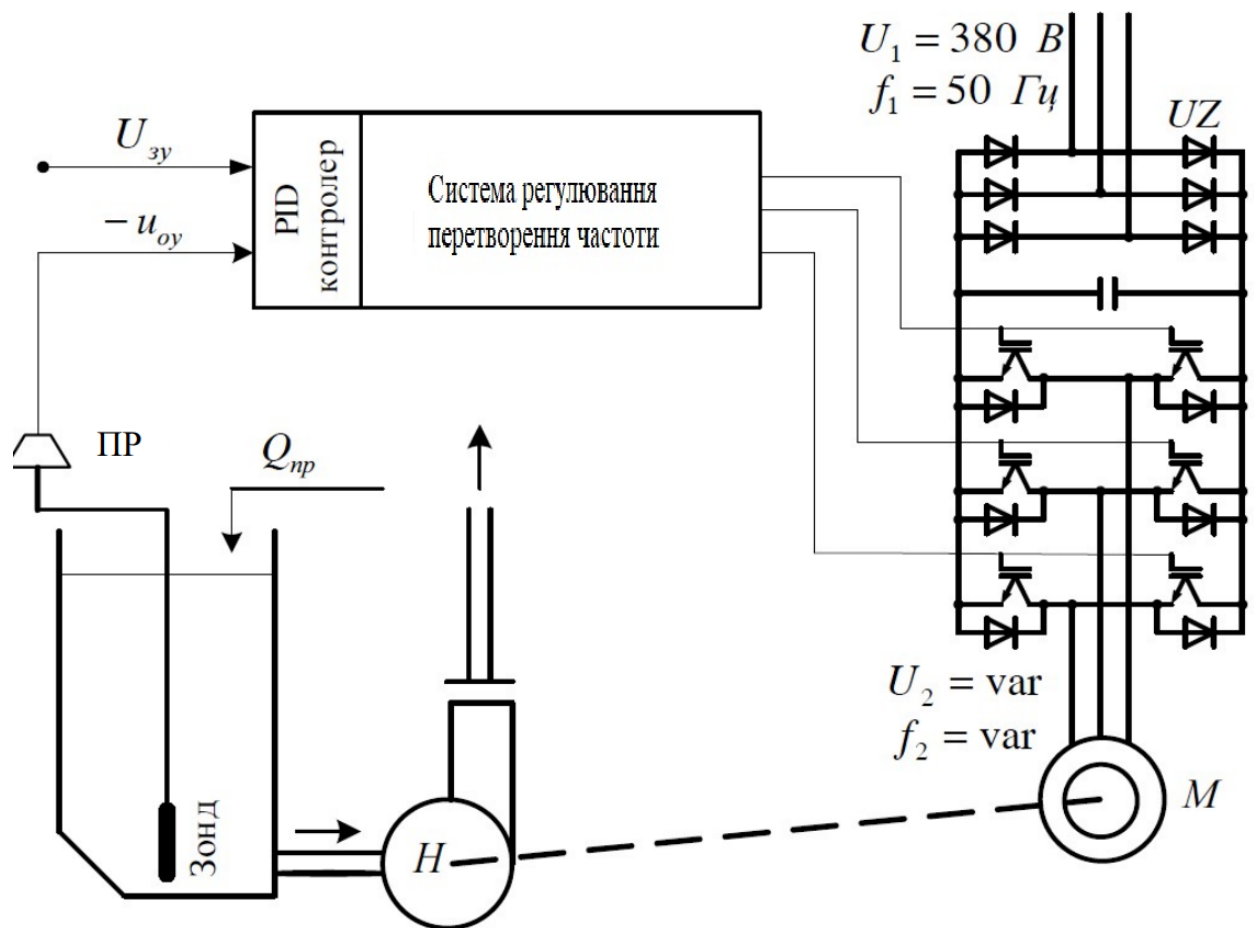


Рисунок 1.9 – Функціональна схема низьковольтного асинхронного частотнорегульованого електропривода насосної установки з АІН в системі автоматичної стабілізації рівня рідини [8]

В установках відносно невеликої потужності (7-10 кВт) завдання регулювання може бути успішно вирішене за допомогою систем регулювання напруги (асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором). В якості регуляторів напруги використовуються тиристорні перемикачі. Віялоподібні механічні характеристики навантаження дозволяють забезпечити стабільну роботу електроприводу через систему тиристорний комутатор - асинхронний двигун в досить великому діапазоні швидкостей без зворотного зв'язку.

Звичайна зміна технологічного режиму за допомогою регульованого електроприводу відбувається досить повільно і вимагає високих швидкостей.

Тому в якості стабілізатора напруги можна використовувати трифазний магнітний підсилювач, підключений до кола статора. Імпульсне регулювання швидкості асинхронного двигуна дуже просте. Замикання і розмикання тиристорного ключа змінює середнє за цикл перемикання значення додаткового опору. Це значення опору пропорційне робочому циклу широтно-імпульсної модуляції. Регулюючи робочий цикл, можна отримати ряд механічних характеристик приводу. Це добре залежить від напруги керування на вході системи керування тиристором. Критичне ковзання двигуна зменшується зі збільшенням додаткового опору, так що навіть при "віяловій" характеристиці механізму діапазон швидкостей стабільної роботи приводу дуже малий. Введення зворотного зв'язку за швидкістю забезпечує жорсткі механічні властивості і стабільну роботу замкненої системи електроприводу в необхідному для механізму діапазоні швидкостей.

Загальним недоліком регульованих електроприводів є те, що при зниженні швидкості двигуна виникають втрати на ковзання. Ці втрати спричиняють додаткове нагрівання двигуна і вимагають завищеної оцінки встановленої потужності двигуна.

В умовах експлуатації, де можуть використовуватися асинхронні двигуни з розщепленими роторами, потенціал приводів з регульованою швидкістю збільшується. Додавання резистора в ланцюг ротора дозволяє усунути частину втрат на ковзання в обмотці двигуна. Це зменшує необхідні габарити двигуна і дозволяє розширити діапазон потужностей приводу для описаних вище методів регулювання швидкості. Наприклад, імпульсний спосіб керування стає більш придатним для вмикання додаткових резисторів у ланцюзі ротора. При цьому механічні властивості приводу забезпечують стабільну роботу в досить великому діапазоні швидкостей при відкритому приводі. [8, 9]

У всіх розглянутих варіантах ККД електроприводу низький через великі втрати на ковзання, що розсіюються у вигляді тепла в обмотках двигуна, регульовальних резисторах або контактних муфтах. Тому в механічних

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електроприводах з вихідною потужністю в сотні і тисячі кіловат використовується каскадне регулювання швидкості, а втрати ковзання повертаються в мережу або на вал двигуна.

Для більших діапазонів регулювання ( $D > 2$ ) і більш високих вимог до жорсткості механічних властивостей приводу перспективними є схеми перетворення частоти на основі транзисторів. Оскільки привід відцентрового механізму не потребує електричного гальмування або реверсу, конструкція транзисторних перетворювачів частоти спрощується і може бути побудована на основі автономного інвертора напруги і керуючого випрямляча.

Спочатку перетворювачі напруги (ПН) використовувалися для регулювання швидкості насоса в безперервному режимі, тобто так званого параметричного регулювання, оскільки надійні і недорогі перетворювачі частоти (ПЧ) були недоступні.

Це привабливо, оскільки тиристорні перетворювачі напруги (ТН) дуже прості і недорогі. Однак існує фундаментальне обмеження для використання параметричного керування в безперервній роботі: високі втрати енергії двигуна. Для використання цього методу ентузіасти завищують встановлену потужність електродвигуна в 2-2,5 рази і використовують спеціально погіршені ротори з підвищеним ковзанням.

Очевидно, що системи з використанням недорогих пристроїв РПН виявилися занадто дорогими і нераціональними в практичному застосуванні. Системи VFD-АТ, які керують швидкістю обертання двигуна шляхом зміни частоти напруги живлення, не мають жодного з перерахованих вище недоліків, оскільки в системах, що використовують ТПЧ, половина енергії, заощадженої насосом, споживається двигуном, що призводить до несподівано короткого терміну служби підшипників та інших компонентів.

З вищесказаного можна зробити важливий висновок: найефективнішим способом регулювання швидкості АТ є одночасна зміна напруги і зміна частоти при використанні ЧРП. При цьому термін окупності капітальних вкладень

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

становить 6-18 місяців, залежно від механізму, режиму роботи та потужності приводного двигуна [8].

Змінювати частоту обертання має сенс лише до певного значення, коли напір турбомеханізму дорівнює статичному напору. При подальшому зниженні продуктивності насоса напір, що створюється турбомеханізмом, який розвивається, буде недостатнім для подолання статичного напору в мережі.

Процес розробки систем автоматичного контролю і регулювання вимагає врахування великої кількості вимог, що обумовлено їх різними характеристиками. Ці вимоги можна розділити на кілька основних груп [10].

Перша група критеріїв включає вимоги до статичних і динамічних характеристик. Найважливішими з них є характеристики точності. Вони визначають похибки, які можуть виникати в системі управління в різних режимах.

До другої групи належать вимоги, що стосуються надійності системи керування та її стійкості до зовнішніх впливів. Сюди в першу чергу відносяться такі вимоги, як можливість безвідмовної роботи, діапазон робочих температур, вібростійкість, термін служби і умови зберігання.

До третьої групи належать вимоги, пов'язані з характером експлуатації системи управління. До них відносяться умови обслуговування системи в процесі експлуатації, кваліфікація обслуговуючого персоналу, можливість ремонту тощо.

Четверта група - вимоги, що стосуються допустимої ваги і габаритів системи та її допустимого енергоспоживання.

П'ята група - вимоги до технологічності системи управління.

У нашому прикладі ми виділили наступні показники якості для системи управління електроприводом насосного агрегату:

- 1) максимальна точність системи;
- 2) максимальний ККД;
- 3) мінімальна вартість;

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4) мінімальні габарити.

#### 1.4 Висновок до першого розділу

В даному розділі дипломного проекту були розглянуті загальні відомості про технічні процеси та завдання автоматизації насосних агрегатів. Наведено інформацію про типи насосних агрегатів та їх складові частини, основні режими роботи та способи забезпечення заданого режиму роботи НС.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 2. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

### 2.1 Створення моделі насосної станції

Налагодити процес вибору моделі насоса ДНС та кількості насосів досить складно, оскільки ці змінні представляють кілька варіантів класичної конструкції ДНС відповідно до експлуатаційних вимог мережі. Джерело води повинно відповідати ключовим вимогам мережі, максимальній витраті ( $Q_{max}$ ) та необхідному максимальному напору ( $H_{max}$ ). Рішення щодо моделі насоса та кількості насосів залежить від критеріїв та досвіду проектувальника [3].

Діаграма кривої напору насоса та кривої уставки показані на рисунку 2.1. Зміни ефективності насоса і напору насоса, зумовлені витратою і різними експлуатаційними обмеженнями, визначаються як змінними моделі насоса, так і змінними кількості насосів. Існує два класичних підходи до визначення цих змінних. Перший підхід полягає в тому, що спочатку обирається модель насоса, яка забезпечує максимальний необхідний напір ( $H_{max}$ ) в мережі. Після того, як модель визначена, кількість насосів визначається шляхом ділення максимальної витрати ( $Q_{max}$ ) на витрату ( $Q_{b1}$ ) одного насоса в моделі, що забезпечує максимальний напір ( $H_{max}$ ). Другий метод полягає в тому, що спочатку визначається кількість насосів, а потім модель насоса. Після визначення кількості насосів максимальна витрата ( $Q_{max}$ ) ділиться на кількість насосів. Отримана в результаті витрата і максимальний необхідний напір ( $H_{max}$ ) - це умови експлуатації, яким повинна відповідати обрана модель насоса. Таким чином, не існує чіткого взаємозв'язку між цими двома змінними (моделлю і кількістю насосів). Це означає, що в класичному проектуванні насосної станції модель насоса відповідає певній кількості УМР. Однак, фіксована кількість насосів може призвести до різних моделей насосів при проектуванні НС.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

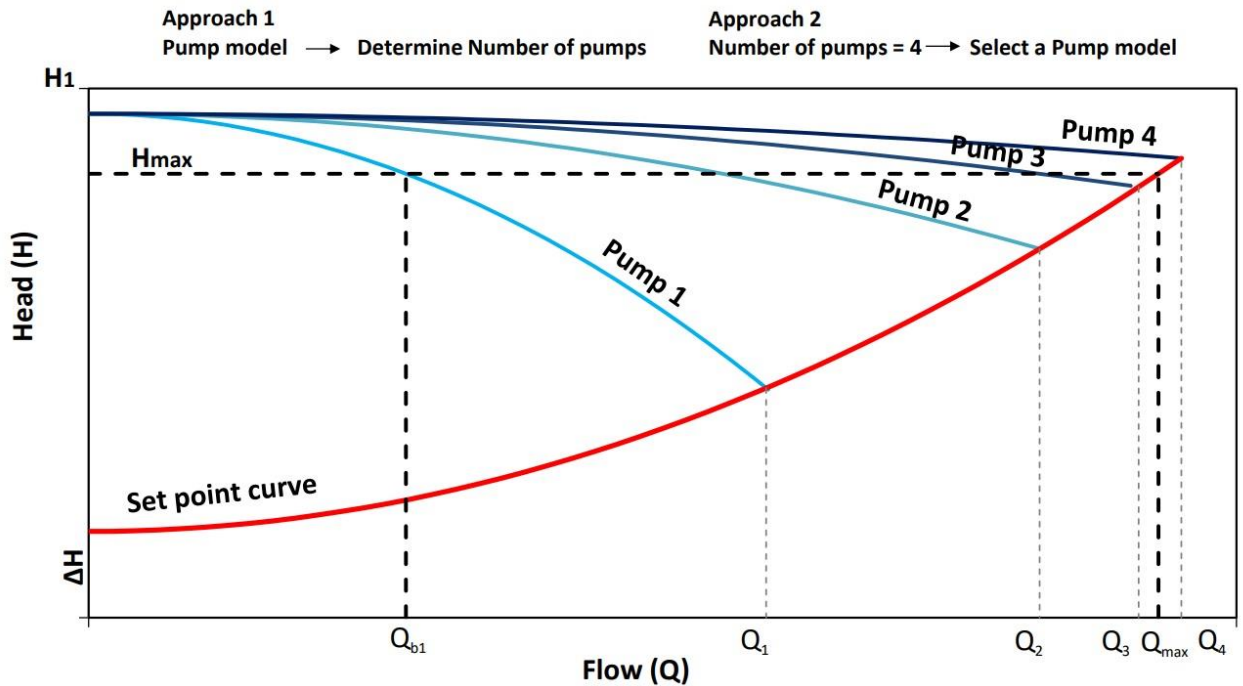


Рисунок 2.1 - Діаграма кривої напорів насоса НС та кривої уставки [3]

Класичне проектування насосної станції складається з визначення моделі насоса, кількості насосів та конфігурації системи керування, яка мінімізує LCC проекту. Дійсно, більшість дослідників, пов'язаних з НС у Західній Європі, зосереджуються на розробці методологій для оптимізації економічних аспектів, таких як інвестиції, технічне обслуговування та експлуатаційні витрати. Наприклад, Остфельд [43] розробив багатоцільову методологію на основі генетичних алгоритмів для оптимізації капітальних, експлуатаційних та технологічних витрат на проектування НС. Аналогічно, Nault та ін. [44] впровадили методологію для оцінки витрат життєвого циклу, чистої теперішньої вартості та викидів CO<sub>2</sub> від НС шляхом аналізу різних сценаріїв управління та умов експлуатації. Крім того, Walski та Creaco [45] проаналізували різні конфігурації насосів, включаючи FSP та VSP різних розмірів та різних умов мережі, щоб вибрати найкращу конфігурацію на основі капітальних та експлуатаційних витрат. Крім того, Леон-Селі та ін. розробили методологію на основі кривої уставки для оптимізації експлуатаційних витрат

на мережі водопостачання та витрат на виробництво води для проектування PS. Паралельно, Diao та ін. проаналізували вплив мережу водопостачання на LCC в різних сценаріях потоків споживання, включаючи однорідні структури напіру та просторові варіації напіру; Martin-Candilejo та ін. [47] розробили економічний метод проектування мережі водопостачання та запропонували економічний метод проектування мережі водопостачання шляхом оптимізації інфраструктурних та операційних витрат. Нарешті, Gutierrez-Bahamondez та ін. розробили методологію проектування НС для вибору оптимальної моделі насоса на основі мінімізації капітальних та експлуатаційних витрат [3]. Крім того, ця методологія також включає оптимальний розподіл потоку для декількох насосних станцій в межах мережі водопостачання.

Однак економічні фактори - це не єдині міркування, які необхідно враховувати в таких інженерних проектах, як проектування підстанцій. Є кілька аспектів, які слід враховувати при проектуванні підстанції. Наприклад, місце розташування, можливість реалізації підстанції, експлуатаційна гнучкість і складність установки. Ці аспекти пов'язані з моделлю насоса і кількістю насосів на станції. Дійсно, однією з найважливіших частин установки електропостачання є електричні вимоги. Існує ряд електричних вимог, які необхідно враховувати, наприклад, електричний щит, електричний захист насосів, розташування електричних кабелів і електроживлення всіх вимірювальних і контрольних елементів. Отже, чим вищі вимоги до електропостачання, тим складніша установка системи керування. Крім того, насосні станції контролюються системами нагляду, управління та збору даних (SCADA) [49]; системи SCADA важко застосовувати на практиці до складних конфігурацій розташування насосів та управління через їх різні набори функцій, через підключення, програмування, технічну підтримку різних компонентів, питання кібербезпеки тощо. Дійсно, деякі автори, такі як Саломонс та ін. [16] і Мантейгас та ін. [17], прагнуть розробити просту і

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

практичну методологію контролера, яка була б здійсненою і практичною для планування роботи насосів у реальному часі в PS. Коротше кажучи, зростаюча складність систем управління НС тягне за собою багато потенційних прихованих витрат, які важко ідентифікувати в бюджеті НС.

Тому інженерні проекти повинні включати технічні критерії на додаток до економічних критеріїв. [18]. Ще одним аспектом, який слід враховувати при проектуванні НС, є екологічні критерії та вплив впровадження мережі водопостачання на навколишнє середовище. Цей аспект набув особливої актуальності у зв'язку з проблемами зміни клімату в останні два десятиліття; для досягнення цілей сталого розвитку і важливо оцінити екологічні аспекти експлуатації таких систем.[19]. Дійсно, було розроблено кілька методологій для оптимізації та покращення екологічних показників, таких як викиди парникових газів від НС та співвідношення наданої висоти підйому до необхідної висоти підйому у мережі водопостачання [20, 21, 22]. Тому, окрім техніко-економічних критеріїв, екологічні аспекти

Тому, на додаток до техніко-економічних критеріїв, в процесі проектування НС важливо враховувати екологічні аспекти. Таким чином, належне проектування НС повинно враховувати технічні, економічні та екологічні критерії разом. Тому багатокритеріальний підхід до прийняття рішень є належним підходом для вирішення цього питання, особливо для критеріїв з конфліктуючими інтересами, таких як проекти НС.

## 2.2 Визначення напрямку моделювання насосної станції

Багатокритеріальне прийняття рішень (БКПР) - це процес оцінки декількох варіантів досягнення мети з точки зору різних критеріїв з метою прийняття остаточного рішення щодо вирішення проблеми. Наприклад, у випадку проектування насосної станції ідеальним рішенням буде модель

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

насоса, яка відповідає умовам експлуатації мережі, займає мінімальну необхідну площу для встановлення та має найнижчі інвестиційні, технічні та експлуатаційні витрати. У той же час, остаточне рішення

Водночас, остаточним рішенням має бути найпростіша конфігурація насоса, з найменшим впливом на навколишнє середовище від встановлення та експлуатації НС. Однак у процесі проектування неможливо задовольнити всі критерії в однаковій мірі. Тому всі потенційні рішення повинні бути оцінені з точки зору критеріїв, розглянутих у проекті НП. Ці оцінки дають змогу ранжувати рішення за кожним критерієм. Існує кілька методів і підходів до вирішення проблеми УЗВ.

Вони залежать, головним чином, від типу інформації, отриманої від особи, яка приймає рішення, та характеристик цієї інформації. Загалом, існує багато методів MCDM, але найбільш поширеними методами MCDM в інженерних задачах є метод впорядкування за подібністю до ідеального рішення (TOPSIS), аналітичний ієрархічний процес (АНР) та аналітичний мережевий процес (ANP). Метод TOPSIS був розроблений Хваном і Юном (Hwang and Yoon) [22]. Цей метод визначає ідеальне та найгірше рішення проблеми. Ідея цього підходу полягає в тому, що обрана альтернатива повинна бути найближчою до ідеального рішення і найвіддаленішою від найгіршого рішення. У цьому підході альтернативи оцінюються за кожним критерієм, і група експертів порівнює набір альтернатив, присвоюючи вагу кожному критерію. Нормалізована оцінка альтернатив за кожним критерієм розраховується як геометрична відстань між кожною альтернативою та ідеальною альтернативою. Нарешті, альтернативи ранжуються відповідно до отриманих відстаней для того, щоб вибрати найбільш підходящу альтернативу з точки зору мети проблеми Метод АНР був розроблений Сааті [22]. Метод складається з багаторівневого ієрархічного формату. Він починається з визначення цілей, далі йдуть критерії, підкритерії і завершується альтернативами. Одним з важливих вхідних даних методу є набір попарних

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порівнянь критеріїв. Ці порівняння оцінюються групою експертів. Ідея цього підходу полягає у визначенні вагових коефіцієнтів важливості критеріїв і підкритеріїв рішення та оцінці альтернатив з точки зору кожного критерію. Ці оцінки дозволяють ранжувати альтернативи по відношенню до цілей, що розглядаються. Метод АНР широко використовується в проектах водного господарства. АНР дозволяє впоратися з невизначеністю таких аспектів, як технічні, економічні, соціальні та екологічні критерії, які можуть мати місце в проектах такого типу. Наприклад, цей багатокритеріальний метод прийняття рішень застосовується для визначення пріоритетності стратегій, що реалізуються в різних системах. Наприклад, Рамінеллі та Коста [23] застосували АНР для визначення найкращих стратегій управління системами водопостачання між виявленням витоків і ремонтом, ефективним використанням води та заміною старих водопровідних мереж. Аналогічно, Taillander та ін. [24] розробили інструмент, заснований на методології АНР, для вибору відповідних стратегій управління каналізаційними системами з урахуванням технічних, соціальних, економічних та екологічних критеріїв. Крім того, Ward та ін. [25] використовували метод АНР та просторовий аналіз для визначення придатних водозбірних ділянок для управління водними ресурсами в Камбоджі; АНР - це MCDM, розроблений Saaty [26], який є оновленою версією методу АНР і базується на узагальненій формі АНР. Метод АНР, з іншого боку, передбачає, що кожен елемент рівня ієрархії є незалежним від усіх інших елементів. Тому критерії та підкритерії вважаються незалежними один від одного. Аналогічно, альтернативи також вважаються незалежними від критеріїв та одна від одної. Таким чином, метод АНР не може визначити взаємозалежність критеріїв; основна ідея методу АНР полягає в аналізі взаємозалежності критеріїв та альтернатив, що утворюють мережеву структуру. Як наслідок, метод АНР є можливим варіантом MCDM, особливо в невизначених і динамічних середовищах.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.3 Методологія розробки системи керування насосами

Система підтримки зазвичай розрахована на задоволення максимальних потреб мережі, тому передбачається, що існує максимальний сейсмічний потік ( $Q_{\max}$ ) і максимальний необхідний загальний динамічний напір ( $H_{\max}$ ), виходячи з потреб мережі в напрузі і послідовності тиску. Загальний динамічний напір визначається як загальний еквівалентний напір, що перекачується, і включає в себе напір на всмоктуванні, статичний напір, втрати напору, викликані тертям в системі трубопроводів, і необхідний тиск у вузлах. Крім того, існує кілька форм вибору кількості стрілок, необхідних для НС. Найпоширеніші гіпотези наступні: одна гіпотеза задає номер насоса і вибирає модель насоса з цього фіксованого значення. Друга гіпотеза полягає в тому, щоб встановити модель насоса відповідно до максимального навантаження на мережу і вказати число (b). Це оцінюється відповідно до наступного твердження, яке є відношенням максимального рівня джиттера системи ( $Q_{\max}$ ) до рівня, який може забезпечити один комп'ютер з повним динамічним напором, коли джиттер напруги дорівнює  $Q_{\max}$ , іншими словами, максимальний динамічний напір ( $Q, h_{\max}$ ). [3]

Термін  $int$  в еквівалії позначається, що  $N_{\text{pumps}}$  є наступним старшим цілим значенням, отриманим у цій віразі. У цьому випадку ми називаємо класичним методом до іншої гіпотези, якщо він є набором моделей насоса відповідно до максимальних вимог до режиму, а потім розраховуємо кількість насосів. У порядку, щоб оптимізувати енергію в насосній системі, крива насоса повинна бути якомога ближчою до кривою заданого значення та переконатися, що ефективність насоса працює близько до ВЕР. Цей стан є відповідним до різних параметрів системи управління, комбінування FSP і VSP і комбінування різних контрольних режимів (потік і тиск). Система керування забезпечує відповідність робочих точок насоса ( $Q, H$ ) кривих заданих значень мережі. Послідовність і протікання системи постійно розподіляються з їх особливими

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потребами і ціною, яка є для PLC. Ці величини поєднуються з параметрами кривого заданого значення, і його замовленнями насоси змінюють швидкість обертання VSP в ордені насоси працюють у тих самих точках кривого заданого значення. Класична система управління має два способи роботи: регулювання тиску і витрати. Пересувний контрольний система встановлює підтримку постійного напору на виході з насосної станції через реле тиску, яке посилює сигнали на ПЛК, і цей пристрій наказує насосній станції підтримувати заданий напір. З іншого боку, повна система контролю перетворюється на вимірювання миттєвого тиску напору і витікає на виходи НС, які потрібно для того, щоб бути в PLC. Це PLC підтримує насосну станцію для роботи на відповідному обертальному участку (N) так, що він натискає на точку руху. Ця робота буде лише аналізувати роботу системи керування потоком. Ймовірно, системи контролю тиску працюють подібним чином. У контрольній системі керування класичним методом, загальним числом насосів ( $b$ ) збільшується число рівневих операційних змін. Ці зміни є визначені за термінами ( $Q_{b1}, Q_{b2}, \dots, Q_{bn}$ ) [3].

$$N_p = \text{int} \left( \frac{Q_{max}}{Q_{b,max}} \right), \quad (2.1)$$

де  $Q_{b,max}$  - максимальний напір, який може бути поданий коли працює 1 насос.

Якщо система керування налаштовується, щоб напір, доданий насосом, був однаковим на необхідному напорі кривої заданого значення, то  $Q_{b,max}$  є точкою перетину між кривою заданого значення та кривою напору і насосів. Таким чином, термін  $i$  приймає значення від 1 до  $n$ , де  $n$  – загальна кількість насосів НС (рис. 2.2). Термін  $N_{max}$  відноситься до загального динамічного напору, коли потік напору максимальний ( $Q_{max}$ ).

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

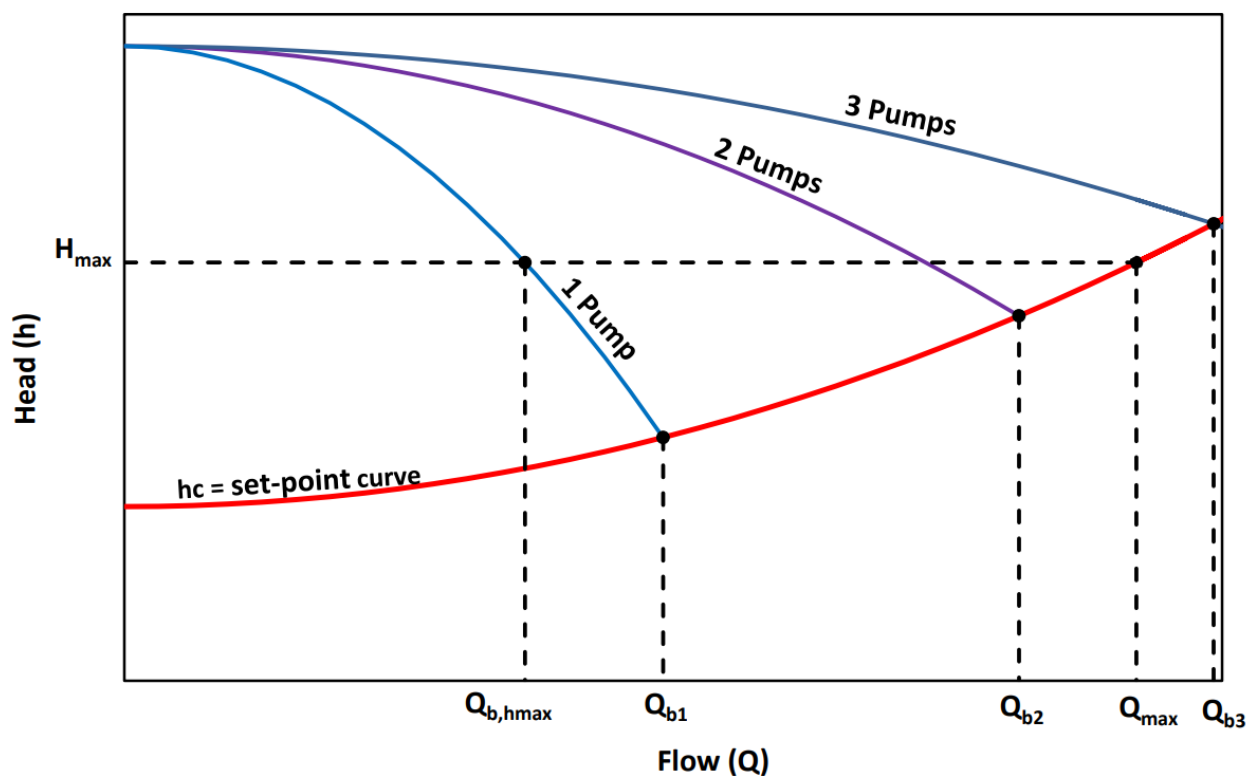


Рисунок 2.2 – Графік зміни напірного тиску в залежності від кількості насосів [3]

У класичному методі, коли напір  $Q$  знаходиться в діапазоні  $0 < Q < Q_{b1}$ , один насос забезпечує тиск на потік зі швидкістю обертання  $N$  відповідно до кривої заданого значення. Де  $N$  може мати значення від  $0 < N < N_0$ , а  $N_0$  відповідає номінальній швидкості обертання. З іншого боку, коли потік  $Q$  знаходиться у другому діапазоні  $Q_{b1} < Q < Q_{b2}$ , один насос працює на 100% номінальної швидкості  $N_0$ , а другий насос працює на відповідній  $N$  швидкості обертання, тому що слідує за кривою заданого значення. Інша альтернатива полягає в тому, що два насоси працюють з однаковою відповідною  $N$  швидкістю обертання відповідно до кривої заданого значення. Коли витрата  $Q$  знаходиться в діапазоні  $Q_{b2} < Q_{b3}$ , два насоси працюють на 100% від номінальної швидкості  $N_0$ , а третій насос працює на  $N$  швидкості обертання відповідно до кривої заданого значення. Інші альтернативи роботи в цьому останньому діапазоні: один насос працює на 100% номінальної швидкості  $N_0$ , а два насоси працюють

на однаковій відповідній  $N$  швидкості обертання відповідно до кривої заданого значення або три насоси працюють на одній відповідній  $N$  швидкості обертання, які відповідають кривій заданого значення. Ідея цієї запропонованої методології проектування НС полягає у визначенні оптимальної кількості насосів і оптимальної конфігурації насосів системи керування для кожної витрати, щоб мінімізувати енергію. Ця методологія починається з кривої заданого значення системи, яка визначає умови потоку та напору ( $Q$ ,  $H$ ), необхідні наприкінці насоса, і з заданої моделі насоса. Оскільки робочий діапазон витрати класичного методу, перевіряються різні конфігурації насосів, що поєднують системи FSP (Насоси з фіксованою швидкістю) і VSP (Насоси з змінною швидкістю) і обчислюють спожиту енергію в кожному налаштуванні для визначення оптимальної кількості FSP і VSP в роботі. Ці конфігурації визначаються шляхом додавання насоса до мінімально необхідної кількості насосів, поки не буде отримано мінімальне споживання енергії. Нарешті, результати енергії різних конфігурацій насосів визначають оптимальну кількість FSP і VSP для кожної швидкості потоку. Підсумовуючи, робочі діапазони витрат і кількість необхідних насосів системи керування класичного методу використовуються відомі. Для того, щоб методологія була систематизована для будь-якої моделі насоса, крива заданого значення та характеризовані криві моделі насоса будуть виражені в безрозмірному вигляді, де ці терміни пов'язані з налаштуваннями насоса. Ця методологія адаптована тільки до закритих систем. Однак цю методологію також можна застосувати до надземних систем зберігання, якщо вона використовується як еталон для кривих напору та витрати ( $H$ ,  $Q$ ), які можуть постачатися насосом. Крім того, передбачається, що НС налаштовані паралельно та оснащені насосами однакових характеристик. Інше припущення полягає в тому, що тип напору відноситься до міського споживання і не змінюється з часом. Крім того, передбачається, що висота всмоктування насоса постійна і не змінюється. Важливо зазначити, що основною метою запропонованої системи керування є

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначення найбільш підходящої конфігурації насоса для отримання оптимальної споживаної енергії. Ця робота не враховує жодних видів витрат, включаючи інвестиційні, експлуатаційні витрати та витрати на технічне обслуговування. У майбутніх дослідженнях можна було б розглянути ці витрати на запропоновану методологію проектування насосних станцій.

#### 2.4 Математичне модель

Крива загального динамічного напору насоса  $H$  і крива ефективності насоса  $\eta$  залежать від витрати  $Q$ . Коли насос обертається з різними швидкостями обертання, на криву загального динамічного напору та криву ефективності впливає швидкість обертання, яка визначається членом  $\alpha$ . Цей член є співвідношенням між реальною швидкістю обертання насоса  $N$  і номінальною швидкістю  $N_0$ . Взявши за посилання закони спорідненості, обидві криві виражаються наступними виразами [3].

$$H = H_1 \alpha^2 - \alpha^{(2-B)} A \left( \frac{Q}{n} \right)^B, \quad (2.2)$$

$$\eta = E \cdot \frac{Q}{\alpha \cdot n} - F \cdot \left( \frac{Q}{\alpha \cdot n} \right)^2, \quad (2.3)$$

$$\alpha = \frac{N}{N_0}. \quad (2.4)$$

Члени  $H_1$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $E$  та  $F$  є коефіцієнтами, які характеризують насос, а член  $n$  є кількістю насосів, яка відповідає насосній системі. Гідравлічна потужність являє собою енергію насоса при подачі деякого потоку з певним напором. Він

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прямо пропорційний питомій вазі води  $\gamma$ , витраті  $Q$  і загальному динамічному напору  $H$ . Незважаючи на те, що ефективність електродвигуна може становити від 90% до 95%, передбачається, що механічна потужність на валу ( $P_a$ ) дорівнює електричній потужності, споживаній групою мотор-насосу  $P$ . Ця потужність включає в себе гідравлічну потужність і втрати потужності на передачі валу. Отже, ККД насоса визначається як співвідношення між гідравлічною потужністю та потужністю на валу. Зв'язок між споживаною потужністю насоса  $P$ , механічним крутним моментом  $M$  і частотою обертання валу  $\omega$  виражається наступним рівнянням:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} = M \cdot \omega = P_a. \quad (2.5)$$

Представлена методологія базується на вираженні рівнянь насоса безрозмірним способом, взявши ВЕР насоса (точка максимального ККД) як еталон. Таким чином, скорочені члени, включаючи загальний динамічний напір  $h$ , потік  $q$ , ефективність  $\theta$ , механічний крутний момент  $\beta$  і потужність  $\pi$ , отримані шляхом співвідношення між значеннями цих змінних і значеннями ВЕР. .

$$h = \frac{H}{H_0}; q = \frac{Q}{Q_0}; \theta = \frac{\eta}{\eta_0}; \beta = \frac{M}{M_0}; \pi = \frac{P}{P_0}; \alpha = \frac{N}{N_0}, \quad (2.6)$$

Взявши за посилання закони спорідненості та описані вище умови, крива тиску напору та крива ефективності в безрозмірній формі виражаються у вигляді наступних рівнянь.

$$h = h_1 \alpha^2 - \alpha^{(2-B)} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{q}{n}\right)^B, \quad (2.7)$$

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h_1 = \frac{H_1}{H_0}, \quad (2.8)$$

$$\alpha = \frac{A \cdot Q_0^B}{H_0}, \quad (2.9)$$

$$\theta = e \cdot \frac{q}{\alpha \cdot n} - f \cdot \left( \frac{q}{\alpha \cdot n} \right)^2, \quad (2.10)$$

$$e = \frac{E \cdot Q_0}{\eta_0}, \quad (2.11)$$

$$f = \frac{F \cdot Q_0^2}{\eta_0}, \quad (2.12)$$

$$\pi = \frac{q \cdot h}{\theta} = \beta \cdot \alpha, \quad (2.13)$$

Перш ніж аналізувати систему керування насосом, важливо визначити криву заданого значення. Ця крива відноситься до потоку напіру  $Q$  і загального динамічного напору, необхідного  $H_c$ , щоб задовольнити мінімальний необхідний тиск напору користувача в критичному вузлі. Крива заданого значення визначається наступним виразом.

$$H_c = \Delta H + R \cdot Q^c. \quad (2.14)$$

Термін  $\Delta H$  відноситься до статичного напору, який визначається як різниця висот між віссю всмоктування насоса та критичним вузлом і додаванням мінімально необхідного тиску критичного вузла. Термін  $R$  є постійним значенням, оскільки тип напору не змінюється з часом, і він пов'язаний із втратами енергії в системі та визначається як опір потоку, представленого в трубопроводах. Нарешті, член  $c$  є експонентою, яка залежить від характеристики системи. Терміни  $R$  і  $c$  отримують шляхом коригування регресії від точок  $H_c$ ,  $Q$  кривої заданого значення до виразу 2.14. Взявши за посилання безрозмірні умови в насосній системі, безрозмірна форма кривої заданого значення призводить до:

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h_c = \lambda_1 + r \cdot q^c, \quad (2.15)$$

де термін  $\lambda_1$  визначається як співвідношення між статичним напором  $\Delta H$  і номінальним напором насоса  $H_0$ ; а член  $r$  пов'язаний з втратами енергії  $R$  і номінальною точкою витрати і напору насоса  $Q_0, H_0$ .

$$\lambda_1 = \frac{\Delta H}{H_0}, \dots\dots\dots (2.16)$$

$$r = \frac{R \cdot Q_0^c}{H_0}, \quad (2.17)$$

Для розробки системи керування насосом важливо визначити швидкість обертання  $\alpha$  насоса, щоб насосна система відповідала кривій заданого значення. Цей тип системи керування ми назвали системою управління потоком, і саме на цій роботі вона зосереджена. Однак, якщо система управління спрямована на підтримку постійного напорі в насосній станції (система контролю тиску), процес аналогічний. Ця швидкість обертання обчислюється в ітераційній формі шляхом встановлення значень швидкості обертання на рівнянні кривої накачування (2.5) і кривій заданого значення (2.16), доки тиск напорі не буде однаковим в обох рівняннях.

Щоб оцінити ефективність насоса, у рівнянні кривої ефективності використовуються закони спорідненості. Закони спорідненості представляють не конгруентність для розрахунку ефективності [27]. Незважаючи на те, що Коельо та Андраде Кампос [28] запропонували вираз, який виправляє неточність законів спорідненості:

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = 1 - \left(1 - \frac{N_1}{N_2}\right),$$

$$f(\alpha) = \frac{\eta_2}{\eta_1} = 1 - \left(1 - \frac{N_1}{N_2}\right), \quad (2.18)$$

Цей вираз (2.18) пов'язує реальну ефективність або скориговану ефективність  $\eta_2$ , коли швидкість обертання насоса дорівнює  $N_2$ , і розрахункову ефективність  $\eta_1$ , коли швидкість обертання дорівнює  $N_1$ . З рівняння (2.18) поправочний коефіцієнт  $f(\alpha)$  визначається в рівнянні (2.15). Цей коефіцієнт коригує ефективність насоса, оцінену за законами спорідненості.

З іншого боку, зменшений механічний крутний момент  $\beta$  у деяких випадках може мати значення, більші за одиницю. У векторній моделі простору знижений механічний крутний момент  $\beta_v$  визначається співвідношенням між механічним крутним моментом  $M$  і максимальним крутним моментом насоса ( $M_{max}$ ). Таким чином,  $\beta_v$  виражається як:

$$\beta_v = \frac{M}{M_{max}}, \quad (2.19)$$

Крім того, механічний крутний момент насоса  $\beta$  і крутний момент можна пов'язати за допомогою наступного виразу:

$$\beta_v = \frac{\beta \cdot M_0}{M_{max}} = \frac{\beta}{\beta_{max}}, \quad (2.20)$$

Іншим важливим аспектом, який слід враховувати при енергетичному аналізі, є зниження ефективності системи через продуктивність частотного перетворювача. Як було зазначено, є кілька робіт, таких [8-13], які аналізують втрати енергії в пристрої, пов'язуючи швидкість обертання та механічний крутний момент. Вони розробили експериментальні таблиці різних частотних перетворювачів, оцінюючи продуктивність з різним механічним крутним моментом і різною швидкістю обертання. Метою цієї методології є розробка

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виразу, який найкраще відповідає експериментальним [29]. Як наслідок, вираз, який найкраще підходить до есе про виконання:

$$\eta_v = \eta_{v,0} \cdot (\beta_v^{k_1} - k_2 \cdot (1 - \alpha)^{k_3}), \quad (2.21)$$

У цьому попередньому рівнянні  $\eta_v$  — продуктивність. Ця величина визначається механічним крутним моментом  $\beta_v$  і частотою обертання  $\alpha$ . Коефіцієнти, які найкраще відповідають кривій ефективності перетворювачів частоти, розроблені [28], були отримані шляхом коригування регресії з експериментальних випробувань. Ці значення:  $k_1 = 0,025$ ,  $k_2 = 0,16$  і  $k_3 = 2,71$ . На рисунку 2.3 показано коригування розробленого виразу регресійною технікою з експериментальними даними. Де горизонтальна вісь представляє швидкість обертання  $\alpha$ , а вертикальна вісь – знижену ефективність  $\theta$ . Різні типи ліній представляють криву регулювання ефективності для різного зниженого механічного крутного моменту  $\beta$ , а точки представляють експериментальні дані, отримані від [30].

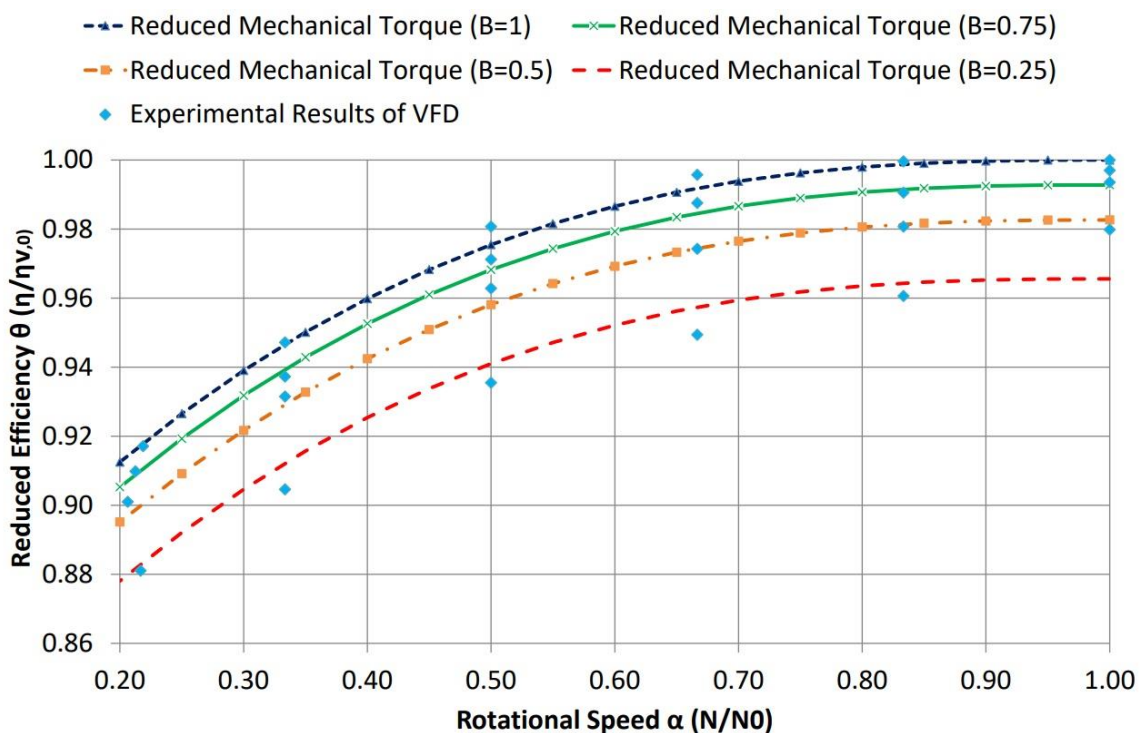


Рисунок 2.3 - Регулювання ККД ЧРП за допомогою експериментальних нарисів

Приведена форма ККД перетворювача частоти виражається наступним рівнянням:

$$\theta_v = \frac{\eta_v}{\eta_{v,o}} = \beta_v^{k_1} - k_2 \cdot (1 - \alpha)^{k_3}$$

Нарешті, необхідно визначити загальний ККД насосної системи  $\eta_c$  та його приведену форму  $\theta_c$  з урахуванням розрахункового ККД та поправки на неточності в характеристиках перетворювача частоти. Математично це виражається наступним чином:

$$\begin{aligned} \eta_c &= \eta \cdot f(\alpha) \cdot \eta_v \\ \theta_c &= \theta \cdot f(\alpha) \cdot \theta_v \cdot \eta_{v,o} \end{aligned}$$

Загальна енергія, споживана насосною системою, виражається наступним рівнянням:

$$\pi_T = \frac{q \cdot h}{\theta_c} = \beta \cdot \alpha \quad . \quad (2.22)$$

Це останнє рівняння дозволяє безрозмірно оцінити споживану енергію для різних варіантів конфігурації насоса для кожного діапазону подачі. Нарешті, цей аналіз дозволяє визначити оптимальну кількість FSP і VSP в експлуатації, що і є метою даного методу.

Члени характеристичних кривих насоса та кривої заданого значення виражені в безрозмірній формі, яка залежить від ВЕР насоса. Таким чином, потік оптимізаційного аналізу насосної системи виражається у скороченій формі  $q$ , яка є співвідношенням між поданим потоком і номінальним потоком

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

насоса  $Q/Q_0$ . Таким же чином загальна споживана енергія виражається у скороченій формі  $\pi_T$ , яка є співвідношенням між спожитою потужністю насоса та номінальною потужністю насосів  $P/P_0$ . Щоб пояснити, як загальний робочий діапазон  $q_{min} < q$ .

Наступним кроком є встановлення мінімально необхідної кількості насосів у дослідженні. З цього моменту будуть визначені всі можливі конфігурації насосів при роботі з FSP і VSP. Наприклад, в першому діапазоні роботи єдина можливість роботи 1 FSP. І навпаки, неможливо оцінити 1 FSP, оскільки він перевищує вимоги систем і не може відповідати кривій заданого значення. У другому діапазоні можливі: 2 VSP або 1 FSP з 1 VSP. Тоді як у третьому діапазоні можливі 3 VSP або 1 FSP з 2 VSP або 2 FSP з 1 VSP. Потім буде оцінено енергію для кожної комбінації насосів у кожній швидкості потоку та визначено мінімально споживану енергію. Після аналізу спожитої енергії з кількістю досліджуваних насосів вона буде збільшена в одному насосі до поточної кількості досліджуваних насосів. З цим збільшенням кількості насосів інший раз визначаються всі комбінації насосів і оцінюється споживана енергія для кожної витрати. Потім визначається мінімальна споживана енергія. Якщо мінімальна споживана енергія з поточною кількістю насосів не збільшується щодо останньої кількості насосів, інший раз вона збільшується в одному насосі до поточної кількості насосів і процес повторюється. Тим не менш, якщо мінімальна споживана енергія цього приросту насосів збільшується відносно останньої кількості насосів, процес зупиняється, а оптимальною кількістю насосів є остання кількість насосів у дослідженні.

На рисунку 2.4 показано, як змінюється енергоспоживання при оцінці різних комбінацій насосів при заданій швидкості потоку. Для прикладу, припустимо, що кількість насосів, розрахована для повної моделі насоса, дорівнює трьом, і що є три робочих діапазони. На рисунку 2.5 показані різні комбінації насосів для другого діапазону  $q_{bl} < q$ . Наприклад, при зменшенні витрати  $q = 2,2$  вводиться другий діапазон, мінімальна кількість насосів - два, а

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливі комбінації - два VSP або один FSP з одним VSP. Потім до цієї витрати додаються три і чотири насоси і оцінюються можливі комбінації: 0 FSP + 2 VSP, 1 FSP + 1 VSP, 0 FSP + 3 VSP, 1 FSP + 2 VSP і 0 FSP + 4 VSP. Існує більше комбінацій для 4 насосів, наприклад, 1 FSP + 3 VSP. Однак цю комбінацію не потрібно оцінювати, оскільки можна зробити висновок, що комбінація 1 FSP + 2 VSP не є оптимальною, а комбінація 1 FSP - 2 VSP споживає більше енергії. Підсумовуючи, на рис. 2.5 показано, що енергетично оптимальною комбінацією насосів для подачі ( $q = 2$ ) є 0 FSP + 3 VSP [3].

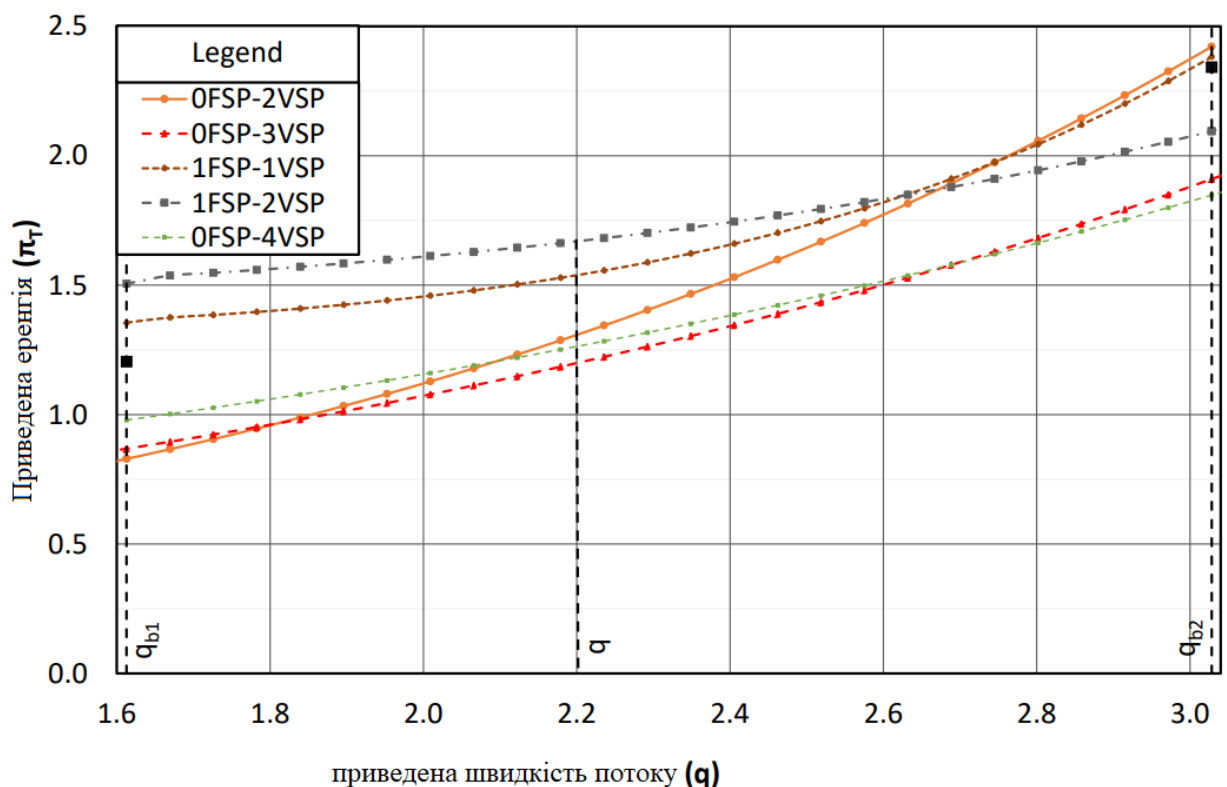


Рисунок 2.4- Графік зміни споживання енергії з різними комбінаціями насосів із заданою витратою

Пунктирні вертикальні лінії на рис.2.5 представляють граничні потоки робочих діапазонів у класній системі. Ці граничні потоки в скороченому вираженні такі:  $q_{b1} = 1,57$ ,  $q_{b2} = 2,61$  і  $q_{max} = 3,16$ . Горизонтальна вісь представляє приведену швидкість потоку  $q$  НС, значення якого від  $0 < q < q_{max}$ . Вертикальна

вісь представляє зменшену споживану потужність  $\pi_T$  насосних конфігурацій. Ці умови  $q$  і  $\pi_T$  пов'язані з ВЕР насоса  $Q_0$  і  $P_0$ .

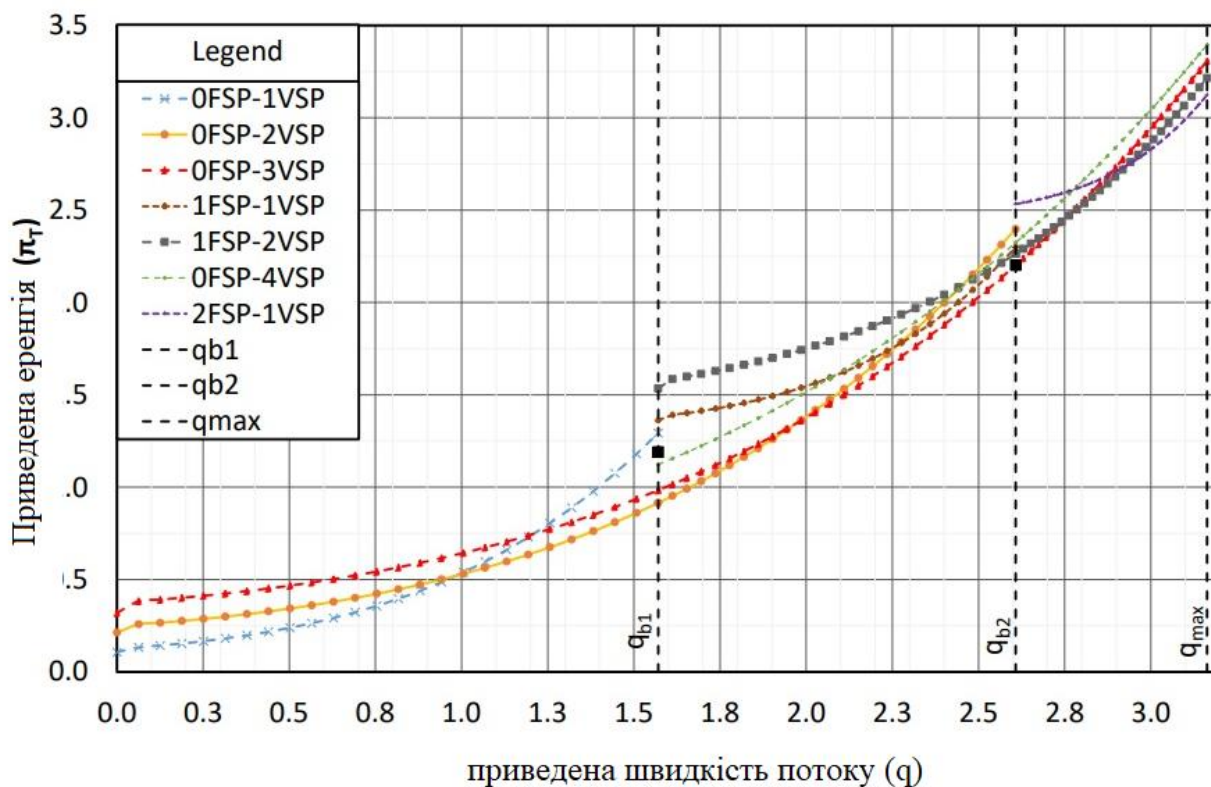


Рисунок 2.5 - Споживана енергія  $\pi_T$  для різних конфігурацій насосів

Позначення написів визначається як  $n$  FSP +  $m$  VSP, де терміни  $n$  і  $m$  є кількістю FSP і VSP відповідно. Кожна легенда ілюструє криву зниженої потужності для різних конфігурацій накачування [3].

Вибраний режим керування активується вмиканням і вимиканням FSP і базується на показаннях манометра для всього напору системи в кінці аварійної ситуації. Ця конфігурація активується реле тиску, яке надсилає в систему сигнали тиску, що вказують на ввімкнення та вимкнення насоса. Ці сигнали відповідають початковому та кінцевому значенням напору кожного FSP. Наприклад, якщо аварійна система складається з трьох насосів, цей режим керування працює наступним чином Початковий напір кожної FSP починається з визначення початкового напору останнього насоса ( $i$  FSP): перетин кривих перекачування 2 FSP і кривої уставки визначає початковий напір останнього

насоса ( $H_{Ai}$ ). Далі визначається початковий напір інших FSP шляхом встановлення кроку напору (наприклад,  $\Delta H = 5$  м). Таким чином, початковий напір другої FSP ( $H_{A2}$ ) визначається як ( $H_{A2} = H_{Ai} + \Delta H$ ); точка перетину  $H_{A2}$  з кривою перекачування першої FSP є початковою точкою другої FSP. З іншого боку, зупиняючий напір починається на останньому FSP ( $H_{Pi}$ ). Цей напір визначається на перетині потоку  $H_{Ai}$  на другій FSP з кривою накачування  $i$  FSP. Для визначення стоп-напору береться напір ( $H_{Pi} + \Delta H$ ), отриманий з другої FSP ( $H_{P2}$ ); перетин потоку цього напору в FSP 1 з кривою накачування в FSP 2 визначає стоп-напір ( $H_{P2}$ ). На наступному рис. 2.6 показано принципову схему прикладу такого режиму керування з трьома FSP. Загалом, обладнання, необхідне для цього режиму керування, - це датчик тиску та реле тиску.

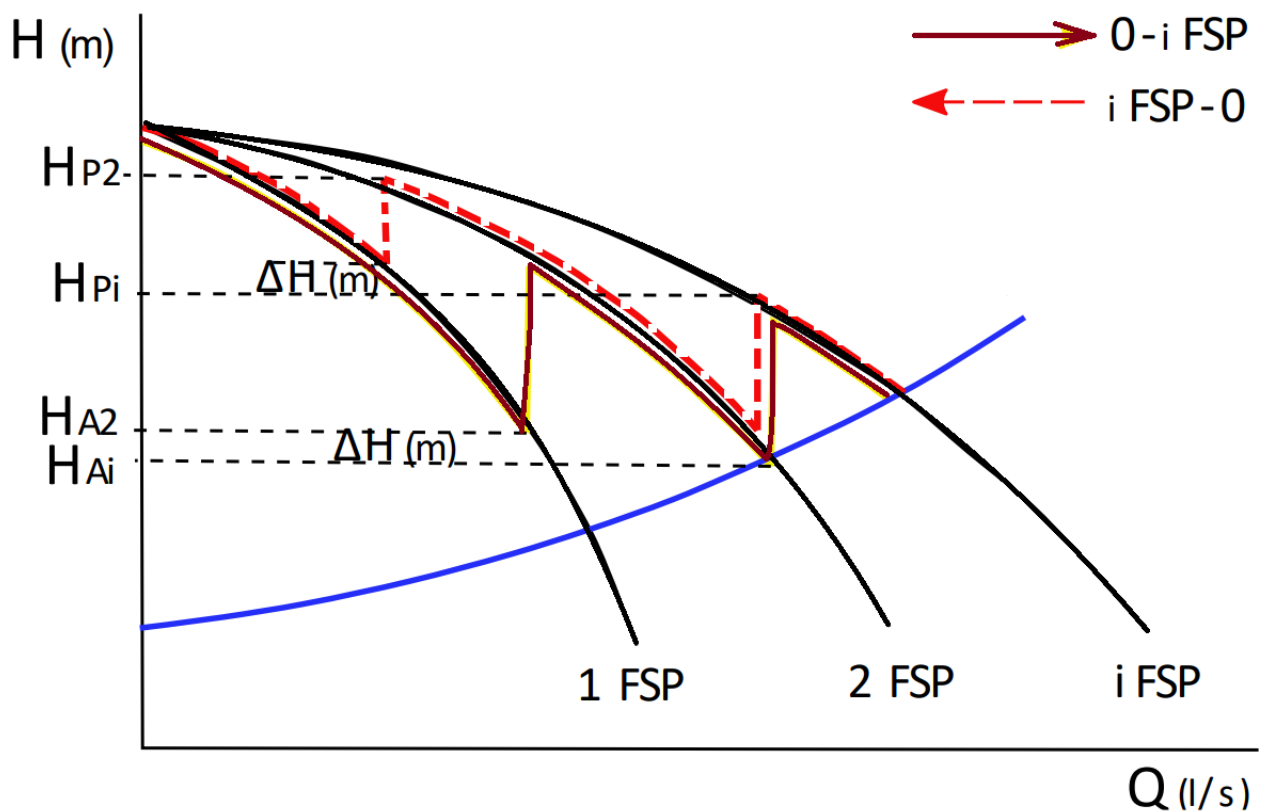


Рисунок 2.5 - Контроль тиску з режимом регулювання FSP

## 2.5 Висновки до другого розділу

Було проведено математичне моделювання роботи насосної станції в залежності від кількості насосів, що необхідно для подальшого проектування системи керування насосною станцією. Визначено, що оптимальним значенням є три насоси з можливістю регулювання швидкості обертання валу електроприводу (система VSP).

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. ПРОЕКТУВАННЯ БЛОКУ АВТОМАТИЗАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

#### 3.1 Аналіз роботи насосної станції

Конструкції НС (насосної станції) орієнтовані на мінімізацію експлуатаційних витрат і задоволення вимог щодо загального динамічного напору  $H$  і витрати  $Q$  водопровідної мережі. Повний динамічний напір - це напір, необхідний насосу для подачі потоку до вузлів системи з необхідним тиском. Цей напір включає висоту всмоктування, статичну висоту, втрати напору, створені системою трубопроводів, і необхідний тиск у вузлах споживання. Першим кроком для проектування НС є вибір моделі насоса з максимальних вимог до мережі  $H_{max}$ ,  $Q_{max}$ . Далі встановлюється режим керування НС. Наприклад, було проведено кілька досліджень для оптимізації витрат на енергію в PS за допомогою математичних моделей планування насосів. Основними математичними методами, що застосовуються для вирішення цих задач, є: лінійне програмування [31], нелінійне програмування [32], динамічне програмування [33]. Ці проблеми планування насосів починаються з фіксованої моделі насоса та фіксованої кількості насосів і складаються з пошуку оптимальних значень змінної рішення. У цьому випадку змінними рішення є стан насосів (увімкнено/вимкнено) на кожному інтервалі часу для мінімізації споживання електроенергії електроприводом. Ці методи були використані для оптимізації різних типів насосних систем: з одним або декількома насосами, з резервуарами-накопичувачами або без них. Одним з обмежень цих методів є їх обчислювальна ефективність, оскільки вони вимагають багато часу обчислення для пошуку оптимального рішення. Інші алгоритми з кращою обчислювальною ефективністю при вирішенні задач планування накачування є GA [3]. Крім того, ці алгоритми можуть мати інші

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змінні рішення, такі як швидкість обертання насосів у кожному інтервалі часу [3].

Традиційний підхід до проектування насосної станції починається з вибору моделі насоса. Після встановлення моделі кількість насосів виходить шляхом ділення максимальної необхідної витрати  $Q_{max}$  на потік, який один насос  $Q_{b1}$  забезпечить при максимальному напорі  $H_{max}$ . Отже, якщо відома модель насоса, конструкція НС була б повністю визначена. Однак між цими двома змінними (модель і кількість насосів) немає однозначного зв'язку. У деяких випадках кількість насосів спочатку фіксується. В останньому випадку буде кілька моделей, які можна встановити в НС. Вибір залежатиме від інших факторів, таких як очікувана ефективність, необхідна автоматизація та інші умови експлуатації. Метод, представлений у цій роботі, спрямований на вибір найкращої комбінації кількості насосів і моделі насоса за різними критеріями. Ці критерії будуть оцінені за допомогою [35] визначив криву заданого значення як теоретичну криву, яка вказує на мінімальну енергію, необхідну в точках джерела (сховищах і насосних станціях), щоб задовольнити мінімальний тиск, необхідний для кожного напіру в мережі. Як наслідок, споживана енергія в електроприводі зменшуватиметься, оскільки крива накачування буде максимально близькою до кривої заданого значення. Відповідна система керування дозволяє наблизити робочі точки насосів до їх оптимальних робочих точок. Система контролю заснована на поєднанні FSP і VSP, а також на вимірюваннях тиску і витрати. Ці конфігурації керування регулюються відповідно до вимог мережі. У загальному випадку наявності як FSP, так і VSP, FSP забезпечує найбільший потрібний потік у верхній частині кривої заданого значення, тоді як VSP забезпечує потік, що залишився, щоб пристосуватись до кривої заданого значення. Крім того, цей насос працює з відповідною швидкістю обертання відповідно до кривої заданого значення [36]. Залежно від типу насосів і регульованих параметрів можна визначити до семи різних систем керування. Важливим є вплив кількості насосів на конструкцію НС. Зазвичай

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цей параметр встановлюється довільно, але деякі елементи НС визначаються за цим критерієм. Запропонована методологія має на меті мінімізувати цей вплив. Таким чином оцінюються різні моделі насосів із бази даних. Потім моделі насосів, які найкраще відповідають умовам мережі, оцінюються за допомогою різних стратегій систем керування. Разом із технічними аспектами, інші важливі аспекти, такі як інвестиції, експлуатаційні витрати та витрати на технічне обслуговування, розглядаються для вибору найбільш підходящої моделі насоса в конструкції. Отже, в цьому методі оцінюються як технічні, так і економічні аспекти. Підсумовуючи, ця методологія розглядає два рівні критеріїв. Техніко-економічні фактори розглядаються як критерії першого рівня. Технічні фактори поділяються на два підкритерії: кількість насосів і складність системи управління. З іншого боку, економічні фактори поділяються на три підкритерії: інвестиційні, експлуатаційні та витрати на технічне обслуговування. Загалом усі ці п'ять аспектів або підкритеріїв вважаються критеріями другого рівня. За кожним критерієм встановлюється рейтинг альтернатив. Це означає абсолютне вимірювання альтернатив за кожним критерієм. Оцінка кожної альтернативи порівнюється із заданим ідеальним значенням оцінки. Це ідеальне значення є найкращим значенням оцінки за кожним критерієм [37].

### 3.2 Вибір елементів насосної станції

Типові випадки використання асинхронних двигунів - насосні станції для водопостачання міст, житлових районів, приватних будинків і підприємств. У більшості випадків ці приводи були розроблені до того, як на ринку з'явилися відносно дешеві і надійні перетворювачі частоти. Як наслідок, використовувалися некеровані електроприводи і подача води не могла регулюватися відповідно до споживання води шляхом зменшення швидкості

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

насоса. Витрата регулювалася шляхом дроселювання потоку рідини за допомогою клапана.

Клапан регулює тиск у трубопроводі при зміні водоспоживання, тоді як електропривод працює з постійною швидкістю. Ці механізми, підібрані на основі максимальної продуктивності, працюють на малих витратах протягом значного часу, що визначається змінами водоспоживання в різний час доби. Крім того, такі системи водопостачання створюють високий тиск у трубопроводі, що призводить до витоків і зносу технологічного обладнання та водопровідної мережі.

Щоб зрозуміти, як відбувається економія енергії, варто розглянути роботу насосних станцій. Насоси використовуються для перекачування води з резервуарів для очищення води у водопровідну мережу. Споживання води ніколи не буває рівномірно розподілене протягом доби. Візьмемо для прикладу водопостачання в одному багатоквартирному будинку. У першій чверті доби, тобто з 12:00 до 6:00 ранку, споживання води незначне, майже відсутнє, що підвищує тиск і навантажує мережу. Як правило, саме в цей час відбувається найбільша кількість відключень води. З 6-ї до 9-ї ранку споживання води стрімко зростає, а тиск падає. На цей час припадає пік водоспоживання. З 9 ранку до 17 години тиск знову зростає, оскільки в цей час мало хто користується водою, а ввечері, в останню чверть, споживання води знову високе, на противагу зниженню тиску.

Встановлення частотного перетворювача в насосній станції допомагає вирівнювати і підтримувати тиск у системі водопостачання. Це досягається за рахунок регулювання швидкості обертання електродвигуна насосного агрегату. Наприклад, максимальна частота обертання становить 1 475 об/хв. Як і у випадку з більшістю насосних агрегатів, їх швидкість є максимальною тільки при роботі без частотного перетворювача. Пропускаючи той самий агрегат через частотний перетворювач, швидкість можна регулювати в необхідному діапазоні. В якості альтернативи, якщо споживання води в мережі невелике,

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електродвигун насосного агрегату може працювати зі швидкістю 1 000 об/хв. Це означає, що якщо двигун має паспортну потужність 25 кВт і повинен працювати протягом усього терміну служби, частотний перетворювач знижує споживану потужність двигуна до 16,6 кВт, заощаджуючи майже 9 кВт.

Окрім оптимізації тиску, економія енергії також досягається завдяки плавному запуску та плавній зупинці насосних агрегатів. Запуск агрегату миттєво збільшує пусковий струм у 6-7 разів і створює навантаження на електродвигун. За допомогою перетворювача можна встановити час для запуску. Наприклад, 10 секунд. Потім частота плавно підвищується, і вал електродвигуна поступово обертається.

Плавний запуск насосного агрегату також захищає мережу від гідроударів, вода подається в мережу поступово і рівномірно, захищає запірну арматуру і зворотні клапани, допомагає уникнути поривів вітру і розривів труб.

Перетворювачі частоти - це сучасні універсальні пристрої, які дуже прості в експлуатації і захищають електродвигун від перенапруги, обривів фаз і будь-яких інших факторів, які можуть виникнути під час роботи.

Насосні станції, обладнані частотними перетворювачами, можуть заощаджувати електроенергію, регулюючи роботу електроприводу відповідно до фактичного споживання води (потенціал економії 20-50%).

Також зменшити споживання води за рахунок зменшення витоків при перевищенні тиску в магістралі, коли фактичне споживання води є низьким (в середньому 5% економії); та знизити витрати на профілактичні ремонти та капітальні ремонти споруд та обладнання (всієї інфраструктури водопостачання) в результаті запобігання аварійних ситуацій, особливо гідроударів, які часто виникають при використанні неконтрольованих електроприводів (доведено, що це збільшує термін служби обладнання щонайменше в 1,5 рази) [3].

Досягти постійної економії тепла в системі водяного опалення за рахунок зменшення втрат води-теплоносія. При необхідності підвищити тиск вище

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нормального. Важливо також повністю автоматизувати систему водопостачання, тим самим скоротивши фонд заробітної плати обслуговуючого та чергового персоналу і виключивши вплив "людського фактору" в роботі системи.

Існує, по суті, два типи насосних станцій, керованих частотними перетворювачами [38]:

- насосні станції з одним насосом і частотним перетворювачем;
- частотні каскади;
- насосні станції з одним насосом і частотним перетворювачем.

Система керування насосом. Цей тип насосних станцій використовується для локального створення і підтримки тиску в системах централізованого водопостачання, для водопостачання невеликих підприємств, житлових будинків і офісних будівель, а також для крапельного зрошення.

Цей тип складається з одного насоса, керованого частотним перетворювачем, який також може управлятися вручну або вмикатися безпосередньо (без частотного перетворювача). Його переваги над іншими типами полягають у тому, що він простий у конструкції і відносно недорогий. Недоліком цього типу насосних станцій є відносно низька надійність (порівняно з іншими типами). Це пов'язано з тим, що водопостачання забезпечується одним насосом (подача води переривається у разі виходу насоса з ладу, проведення планового технічного обслуговування або ремонту). Тому цей тип слід використовувати там, де тимчасові перебої водопостачання не є критичними.

Каскадні насосні станції використовуються для водопостачання житлових районів і великих підприємств. Вона складається з декількох двигунів, керованих одним перетворювачем частоти (деякі перетворювачі частоти можуть керувати до 14 насосами). У цьому випадку відбувається наступне (знову ж таки на прикладі квартири): протягом першої чверті доби (з 12 години ночі до 6 години ранку) споживання води мінімальне і практично відсутнє, тому

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тиск підтримується одним насосом. З 6-ї до 9-ї години ранку споживання води стрімко зростає, а тиск падає. З 9 ранку до 17 години тиск знову зростає, і насоси, які працювали безпосередньо від водопровідної води, вимикаються, оскільки в цей час мало хто користується водою. В останню чверть дня знову вмикається необхідна кількість двигунів, щоб забезпечити заданий тиск, оскільки споживання води знову є високим, на відміну від зниження тиску.

Цей тип керування також може забезпечити однаковий час роботи кожного двигуна. Точність та ефективність керування залежить від кількості встановлених насосних агрегатів.

Таким чином, частотно-каскадне керування насосними станціями має достатню надійність, вищу точність і ефективність керування порівняно з однодвигунними насосними станціями, але за дещо вищу вартість.

### 3.3 Розробка блоку системи керування електроприводом

Відповідно до системи водопостачання вибираємо частотний перетворювач Компактність і функціональність.

Головне призначення перетворювача частоти Bosch Rexroth VFC-3610 – контроль споживання електроенергії, визначення швидкості та напрямки обертання також служить для своєчасного обслуговування без зупинки технологічного процесу, коли перевищено термін служби пристрою. Мають функцію підвищення моменту, що крутиться, так само каскадне управління насосами. Можливе встановлення в притулок для економії простору.  
[39]. Характеристики:

- потужність електродвигунів 0,37 – 7.5кВт
- вхідна напруга 1-фазне 200...240 V (-10%/+10%) або 3-х фазне 380...480 V (-15%/+10%)
- вихідна напруга 3-х фазне

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- вбудований PLC (ПЛК)
- вбудований ПД - регулятор
- скалярний керування U/F, з компенсацією ковзання - глибина регулювання 1:50
- вихідна частота 0-400 Гц
- діапазон несучої частоти ШІМ - 1-15 кГц
- ККД >95% - завдання і утримання нульової швидкості;
- зв'язок по MODBUS (швидкість до 38400 біт/сек), а так само модулі Profibus, DeviseNet, LonWorks

Потужність 0.4 кВт - 7.5 кВт, 1ф/220В або 3ф/380В.

Перевантажувальна здатність Bosch Rexroth VFC 3610

В інтенсивному режимі - 150% від номінального струму протягом 60 сек.

У нормальному режимі - 120% від номінального струму протягом 60 сек.

Режими управління

Скалярний: Крива U/f, Лінійний режим, режим квадратичної залежності, користувальницький режим багатоточкової кривий

Пусковий момент 150 % від номінального крутного моменту при 3 Гц, 100 % від номінального крутного моменту при 1,5 Гц

Рампи прискорення/уповільнення: Лінійний, S-подібна крива, 8 установок часу прискорення/гальмування: 0,1...6000,0 з

Гальмування постійним струмом: Початкова частота гальмування: 0...50 Гц, Час гальмування: 0...20 с, Струм зупинки: 0.0...150.0 %

Функція поштовхове режиму: Діапазон частоти поштовхове режими: від 0 Гц до 400 Гц, Час прискорення / гальмування в поштовхову режимі: 0,1...6000,0 с.

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.1 – Частотний перетворювач Bosch Rexroth VFC-3610

Багатошвидкісне регулювання:

- 16 етапів через управління з цифрових входів;
- Автоматичне підстроювання несучої частоти;
- Перший і другий джерело налаштування частоти;
- Компенсація ковзання;
- ПД регулювання ;
- Управління в режимі простого ПЛК: 16 етапів з управлінням за типом пауза/зупинка;
- ПД - регулювання з функцією режиму очікування/активації;
- Входи/виходи ;

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 5 цифрових входів підтримують підключення PNP та NPN, X5 підтримує імпульсний вхід 50 кГц;
- 2 аналогових входи: 0/2...10 В або 0/4...20 мА;
- 1 цифровий вихід з відкритим колектором, підтримує імпульсний вихід на 32 кГц і підключення проводки для пониження і підвищення напруги;
- 1 релейний вихід;
- Аналоговий вихід, 0/2...10 В або 0/4...20 мА, для виведення робочої частоти, вихідної частоти, вихідного струму, вихідний потужності, вихідної напруги, аналогового вхідного напруги та аналогового вхідного струму.

Основні функції Bosch Rexroth VFC 3610:

- функція підвищення крутного моменту;
- каскадне управління насосами;
- захист насоса від сухого ходу;
- автоматична стабілізація напруги;
- повторний запуск після падіння напруги;
- 2/3-проводове управління;
- параметри швидкого запуску;
- реплікація параметрів;
- обмеження вихідного струму;
- відновлення після збою живлення;
- вбудований гальмівний переривач (до 18,5 кВт);
- тепловий захист двигуна без датчика температури;
- тепловий захист двигуна з допомогою датчика температури;
- демпфірування коливань малої навантаженні;
- стабілізація напруги при підвищеному навантаженні/

Схема підключення показана на рис. 3.2

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



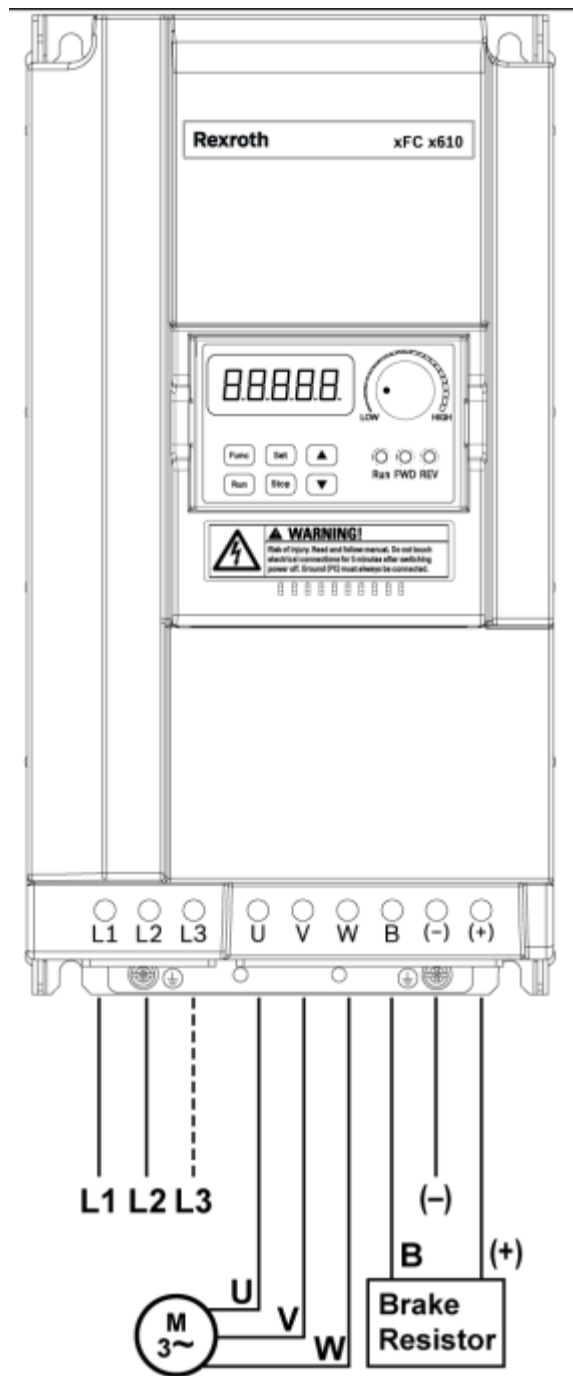


Рисунок 3.3 - Загальний вид контролера і його габаритні розміри

Для контролю тиску на виході насоса підбирається перетворювач тиску(датчик) за параметрами максимально можливого тиску в трубопроводі. Для цього завдання обрані датчики тиску з запасом міцності з діапазоном вимірювання 0-6 бар виробництва Danfoss серії MBS1700.

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

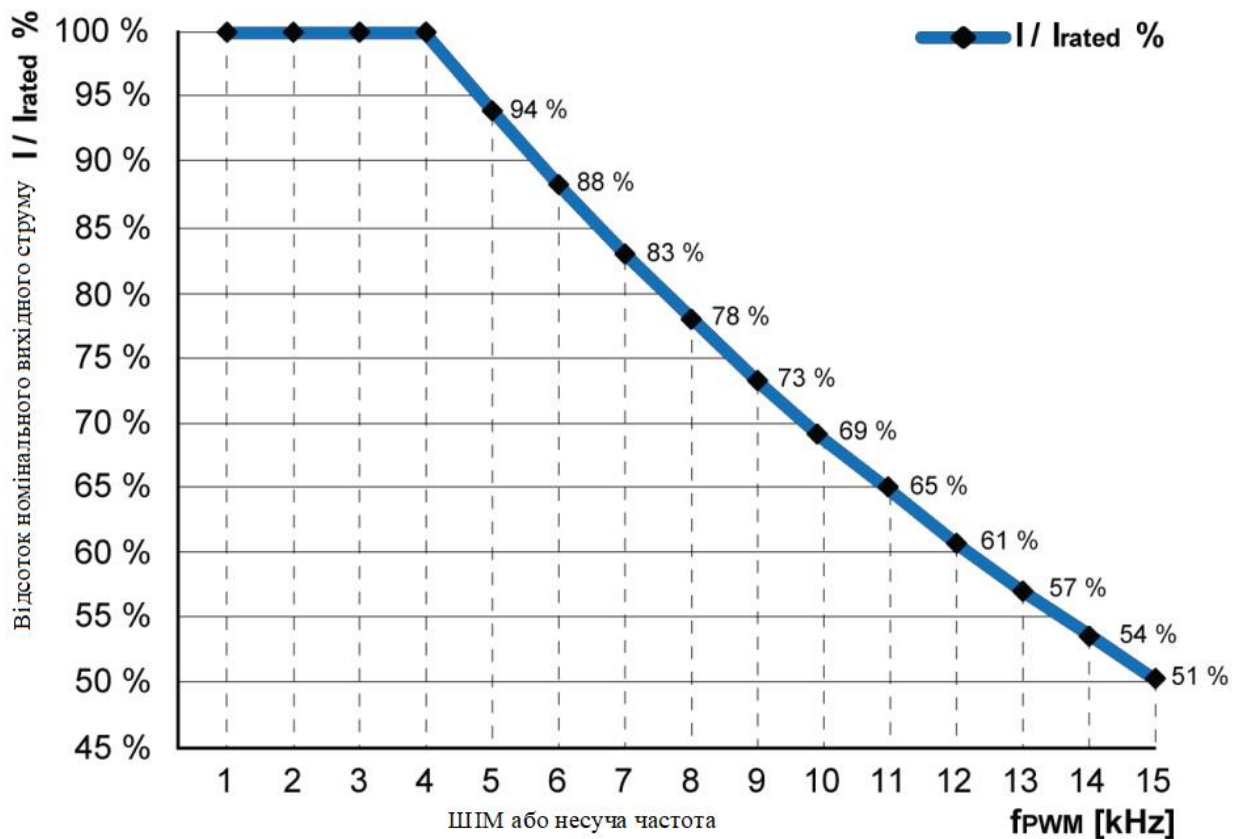
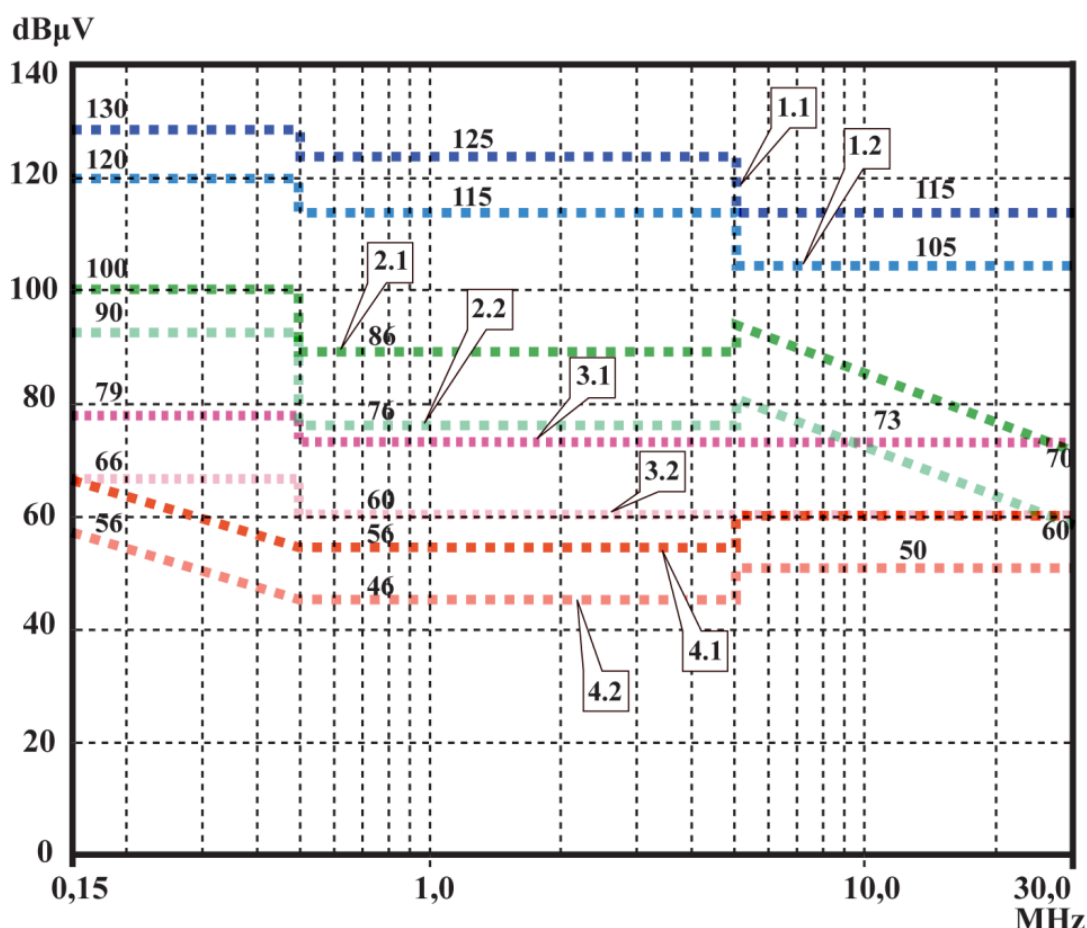


Рисунок 3.4 - Зниження номінальних характеристик і несучої частоти

Цей компактний датчик тиску призначений для використання в якості перетворювача частоти загального призначення, забезпечуючи надійне вимірювання тиску навіть у важких умовах експлуатації. Датчик має вихідний сигнал 4-20 мА, який підключається до одного з аналогових входів частотного перетворювача.

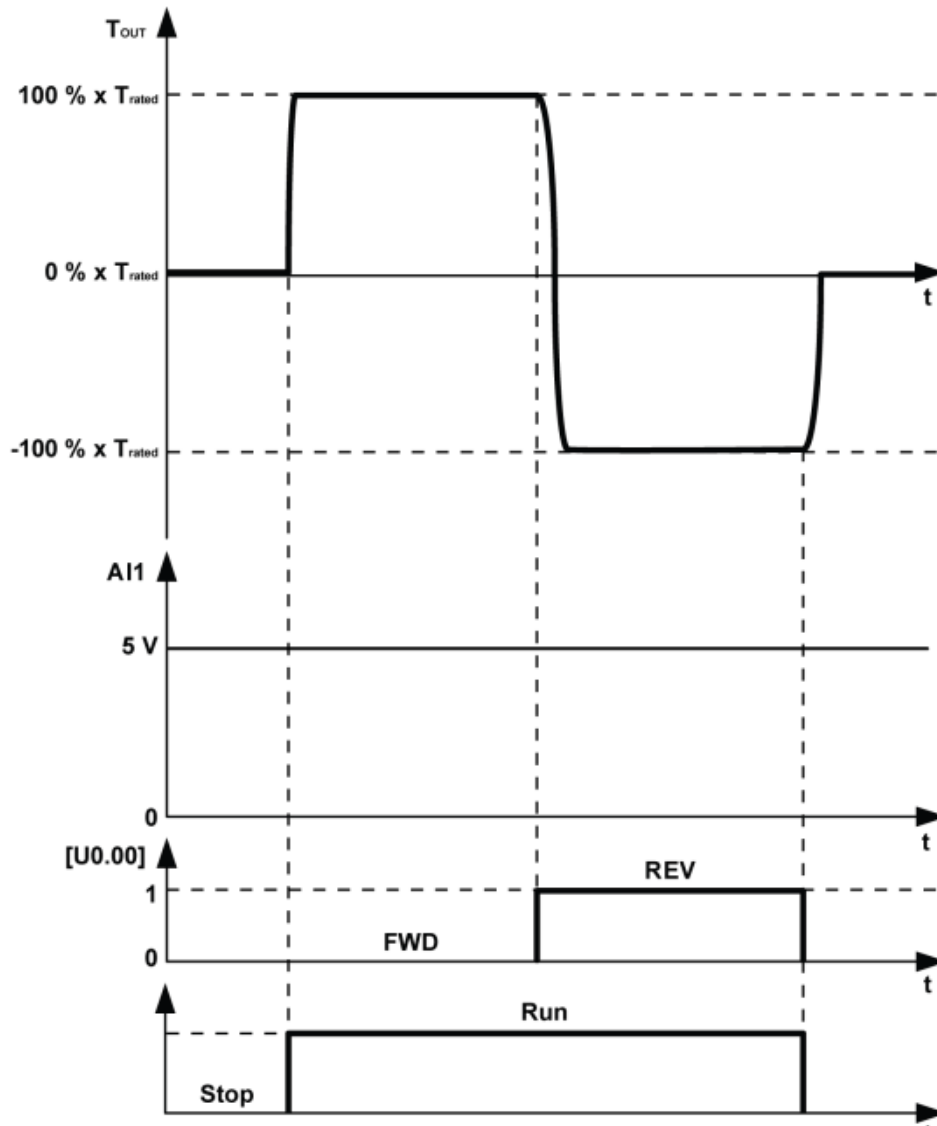
В якості захисту насоса використовуються різні типи реле, що запобігають запуску агрегату при відсутності рідини у вхідному трубопроводі. Найпоширеніші з них - реле тиску і реле витрати. Після порівняння середніх ринкових цін на реле тиску і реле витрати було обрано найпростіше і відносно недороге реле тиску: реле Danfoss серії KPI 35. Це реле призначене для регулювання, поточного контролю та сигналізації в промисловості. Реле оснащено однополюсним вимикачем, який замикає або розмикає електричний ланцюг при зміні тиску в системі в порівнянні з заданим значенням.



- 1.1 C3 2 середовище, QP,  $I > 100$  А (клас А, група 2,  $I > 100$  А)
- 1.2 C3 2 середовище, AV,  $I > 100$  А (клас А, група 2,  $I > 100$  А)
- 2.1 C3 2 середовище, QP,  $I \leq 100$  А (клас А, група 2,  $I \leq 100$  А)
- 2.2 C3 2 середовище, AV,  $I \leq 100$  А (клас А, група 2,  $I \leq 100$  А)
- 3.1 C2 1 перше середовище, QP (1-е середовище, навіть якщо джерело перешкод у 2nd середовище) (клас А, група 1)
- 3.2 C2 1 1-е середовище, AV (1-е середовище, навіть якщо джерело перешкод у 2nd середовище) (клас А, група 1)
- 4.1 C1 1 перше середовище, QP (1-е середовище, навіть якщо джерело перешкод у 2nd середовище) (клас В, група 1)
- 4.2 C1 1 1-е середовище, AV (1-е середовище, навіть якщо джерело перешкод у 2nd середовище) (клас В, група 1)

Рисунок. 3.5 - Граничні значення для лінійних перешкод (IEC 61800-3);  
гранична характеристика через діапазон частот

Програмування моменту здійснюється за законом, що представлені на рис.3.6, та 3.7.



$T_{OUT}$  - Вихідний момент

$T_{rated}$  - Номінальний крутний момент

t - Час

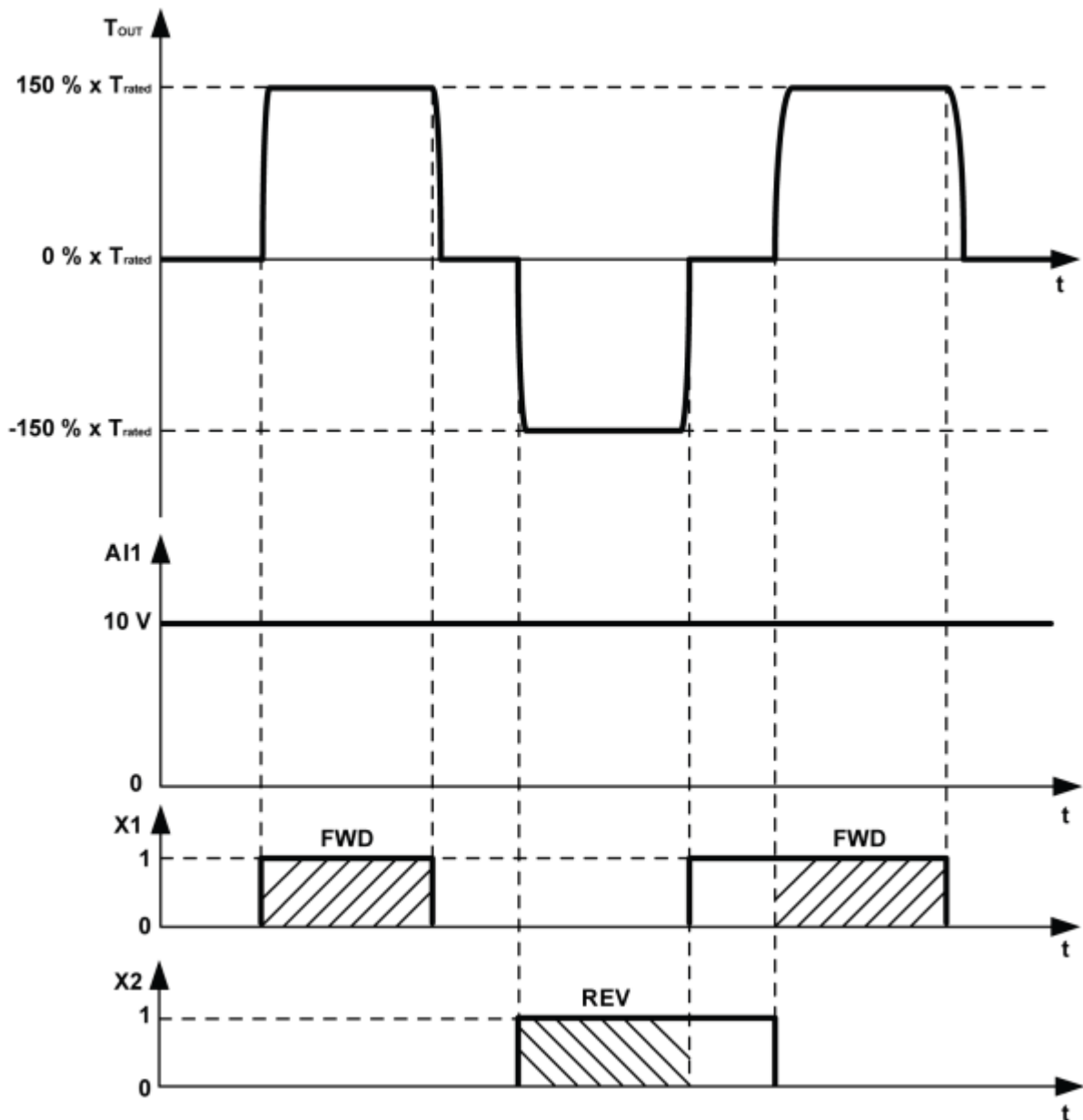
FWD - вперед

REV - Реверс

RUN - Команда Виконати

STOP- Команда зупинити

Рисунок 3.6 - Встановлення напрямку опорного моменту за допомогою панелі керування



приклад 2:

[E0.01] = '1: Багатофункціональний цифровий вхід'

[E1.15] = '0: 2-провідний вперед/стоп, назад/стоп'

[E1.00] = '35: рух вперед (FWD)', [E1.01] = '36: рух назад (REV)'

Рисунок 3.7 - Встановлення напрямку опорного моменту за допомогою панелі керування

Система управління насосом забезпечує:

1) роботу насоса по одному з 10 закладених в контролер алгоритмів. Настройка алгоритму здійснюється за допомогою DIP-перемикача, розташованого на лицьовій панелі контролера.

Категорично забороняється: експлуатувати контролер із знятою кришкою; експлуатувати контролер з механічними пошкодженнями; усувати несправності при поданому на контролер електроживленні.

Застосування регульованих електроприводів дозволяє оптимізувати роботу електродвигунів і виключити непродуктивні витрати електроенергії, а також досягти значної економії тепла (до 10%) і зниження витрат води (до 20%) в системах теплопостачання та водопостачання. За експертними оцінками, впровадження регульованого електроприводу в енергетиці, промисловості, житлово-комунальному господарстві та інших галузях по всій країні може заощадити 35-40 млрд кВт-год електроенергії на рік, що еквівалентно річному виробленню 30 енергоблоків потужністю 300 МВт кожен.

Економію електроенергії від використання регульованих електроприводів можна проілюструвати на прикладі узагальненої технологічної схеми системи подачі води в мережу споживачів з постійним заданим тиском. Аналогічний підхід може бути застосований і до інших технічних схем, де транспортуються рідини або газу.

Схема підключення насосної станції може мати вигляд як на рис.3.8. Можна виділити наступні основні технічні параметри:  $Z_1, Z_2$  - технологічні засувки;  $P$  - насосний агрегат;  $K_1$  - Зворотний клапан;  $F$  - Фільтр;  $K_2$  - регулюючий клапан,  $H_1$  - напір, що створюється джерелом водопостачання,  $H_p$  - напір, що утримується після насосного агрегату,  $H_k$  - напір перед регулюючим клапаном,  $H_c$  - напір в мережі споживачів і  $Q_1-Q_3$  - витрати води споживачами мережі. Крім того, можна розрізняти напір  $H_n$ , що створюється насосною установкою, і втрати напору в елементах системи, розташованих між насосною установкою  $P$  і споживчою мережею:  $D_{n1}$  - втрати напору на вентилі 32 і водоочиснику,  $D_{n2}$  - втрати напору на регулюючому вентилі.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

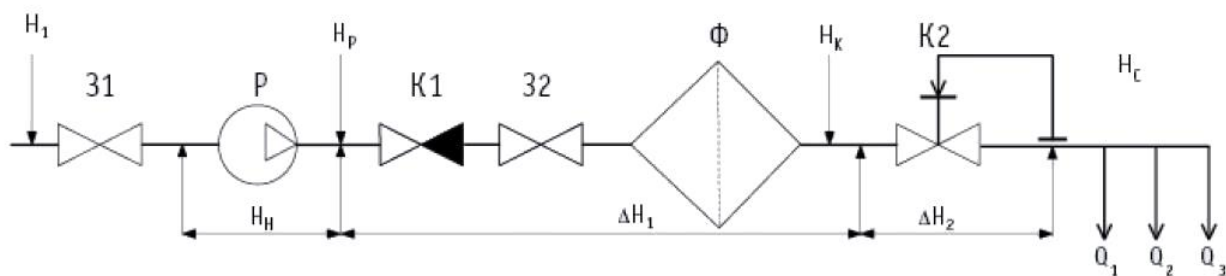


Рисунок 3.8 - Приклад спрощеної технологічної схеми з насосними агрегатами

Враховуючи енергетичні характеристики технологічних процесів установки, (корисну) енергію, необхідну для подачі води споживачеві, можна розрахувати наступним чином

$$W_c = H_c(Q_1 + Q_2 + Q_3). \quad (3.1)$$

Для того, щоб мережа працювала належним чином, напір  $H_c$  у багатьох випадках повинен підтримуватися на постійному рівні. Витрати  $Q_1$ - $Q_3$  визначаються споживачем і можуть змінюватися з часом.

Гідравлічна енергія, що розвивається насосним агрегатом, може бути визначена за допомогою наступного рівняння

$$W_H = H_n(Q_1 + Q_2 + Q_3), \quad (3.2)$$

де  $Q_c$  - це загальна витрата води в мережі. В ідеалі,  $W_c$  і  $W_H$  повинні бути рівними. В реальності між насосною установкою та мережею є елемент з власною гідравлічною опорою, який втрачає частину напору, що створюється насосною установкою.

$$W_H = W_{H1} + W_{H2}. \quad (3.3)$$

Таким чином, втрати енергії, необхідні для технічної підтримки параметрів перекачування, можна визначити наступним чином.

$$D_{wp} = D_{NP} Q_c. \quad (3.4)$$

Отже, для підтримання заданих технічних параметрів мережі насос повинен генерувати гідравлічну потужність, що дорівнює

$$W_H = H_c(Q_1 + Q_2 + Q_3) + D_{NP}(Q_1 + Q_2 + Q_3). \quad (3.5)$$

Останнє рівняння показує, що втрати енергії в технологічному процесі залежать від витрати мережі (технічного навантаження), що визначається споживачами, та втрат напору в обладнанні насосної станції ДНС, які визначаються гідравлічними опорами елементів контуру. У загальному випадку ці втрати тиску можна оцінити, порівнюючи показання манометрів перед 32 засувками з показаннями мережевого трубопроводу. Чим більша різниця між цими вимірами, тим більші втрати енергії в системі. Для того, щоб організувати технологічний процес з мінімальними втратами енергії, спочатку необхідно зменшити втрати тиску між трубопроводом насосного агрегату та мережею споживача.

Розглянемо роботу технологічного процесу в умовах зміни параметра навантаження мережі  $Q_c$ . (див. рис.3.9) Для цього використаємо відомі Q-H характеристики насосного агрегату та мережі. Крива 1 відповідає напірним характеристикам насосного агрегату, а крива 2 - гідравлічним характеристикам мережі. Точка перетину цих характеристик є ідеальною розрахунковою точкою (QHOM) для спільної роботи насосного агрегату та мережі. При зміні витрати мережі змінюються і її гідравлічні характеристики (лінії 3-5). Перетин характеристик переміщується відповідно. Як видно з діаграми, при зменшенні витрати тиск в мережі зростає.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, під час роботи, в залежності від режиму роботи системи, може змінюватися тиск перед насосом, спричинений джерелом водопостачання. Ця зміна тиску також впливає на тиск в мережі споживача.

Характер взаємозв'язку між цими параметрами зумовлює необхідність встановлення в системі дросельних елементів регулювання, тобто регулюючих клапанів (роль яких може виконувати напірна засувка агрегату). Ці елементи створюють додатковий гідравлічний опір і забезпечують стабільний тиск в мережевому трубопроводі. При використанні дросельних елементів відбувається розподіл тиску по елементах системи.



Рисунок 3.9 – Характеристики насосного агрегату і мережі з дросельним регулюванням

Відповідно до обраних елементів розробимо електричну схему підключення. Варіант такої схеми показано на рис. 3.10.

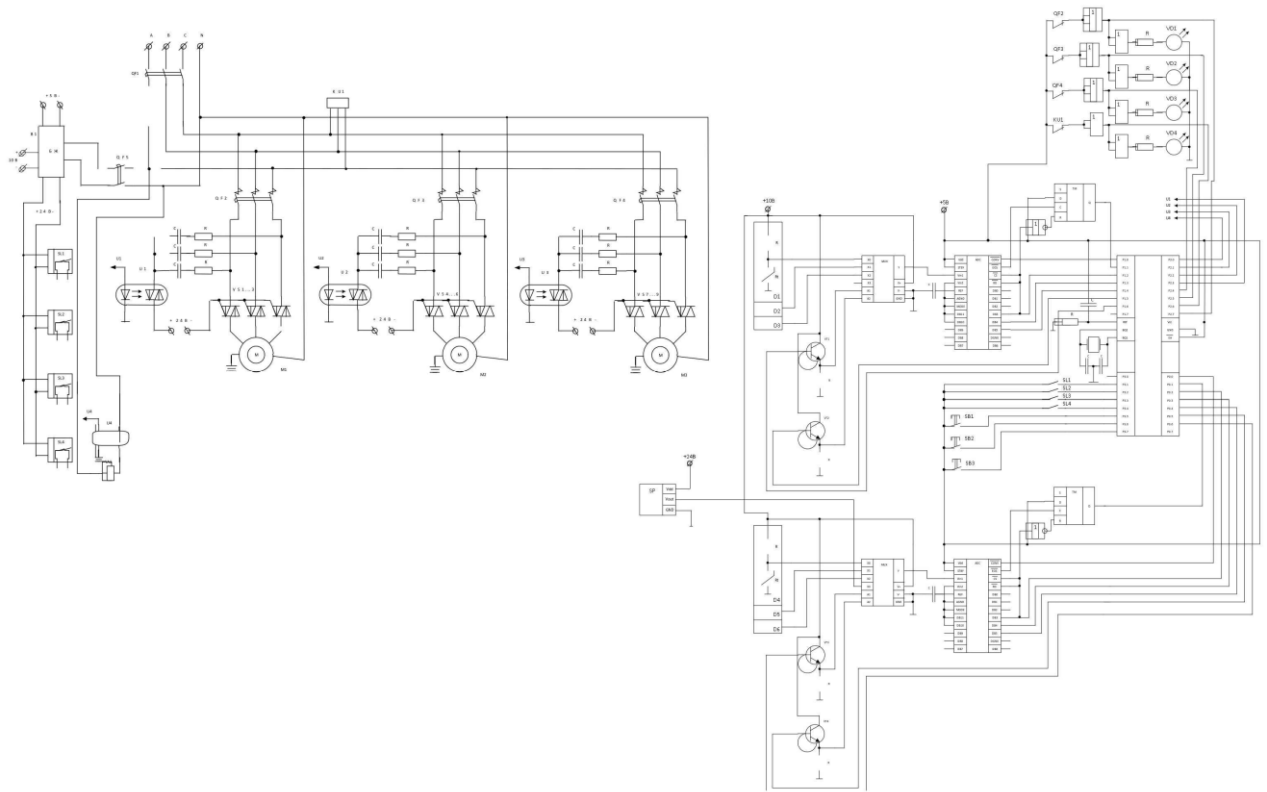


Рисунок 3.10 – Електрична схема принципова

Частотний програмний перетворювач розташовується у корпусі блоку, що показано на рис.3.11, що був розроблений у програмному середовищі SolidWorks.

Блок складається з корпусу 1, передня панель 2, частотного перетворювача 3, блоку теплових реле 4, блоку вимикачів 5, кнопки включення автоматичного режиму 6, кнопки включення ручного режиму 7, додаткових контактів 8, блоку живлення 9, кулера 10, ручки кришки 11, індикатора помилки 12, індикатора стану 13, індикатора автоматичного режиму 14, індикатора ручного режиму 15, кнопки аварійного відключення 16, кнопки стоп 17 та кнопки старт 18.

Блок керування електроприводом насосної станції працює наступним чином: при номінальному навантаженні працює основний насос, керований частотним перетворювачем.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

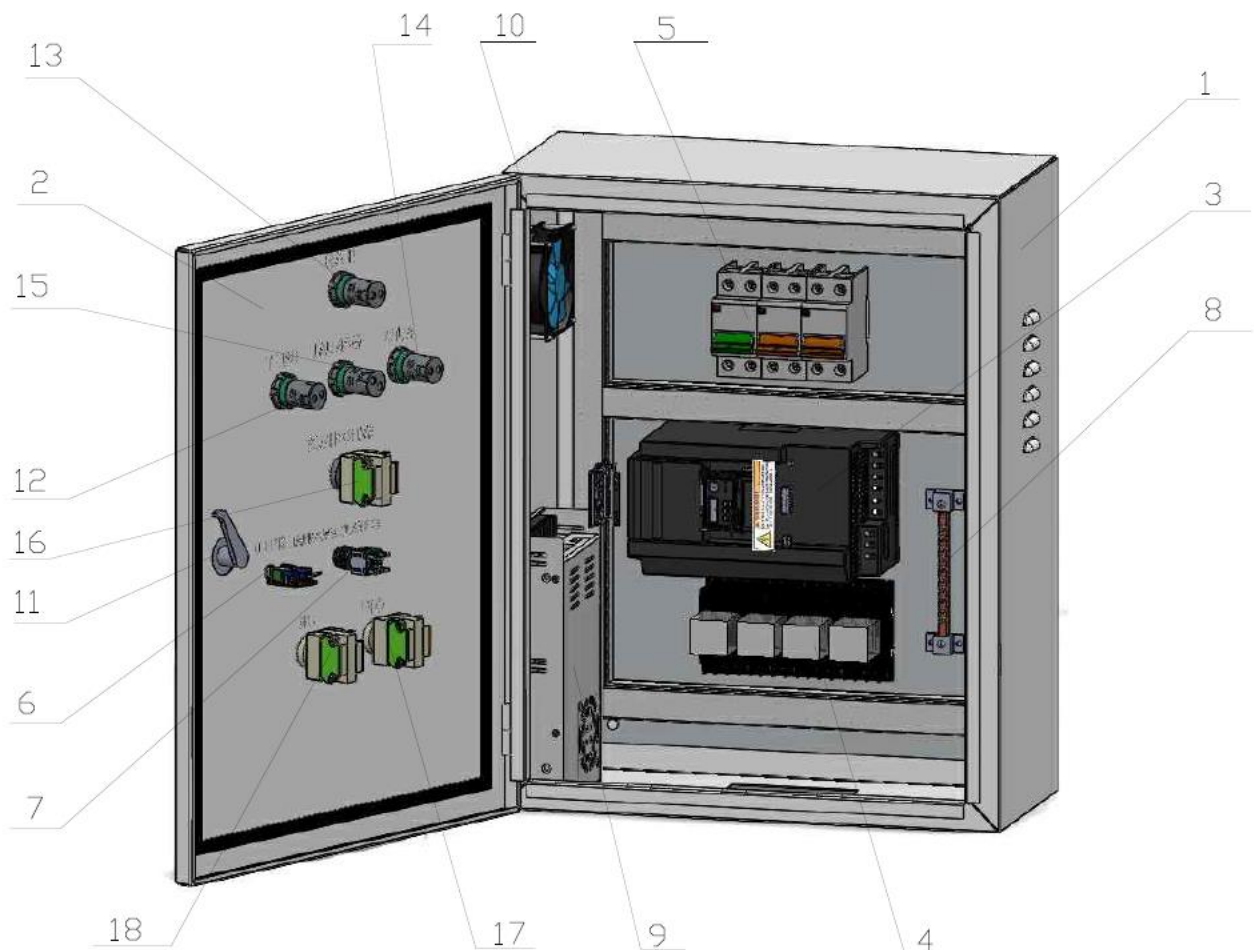


Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд корпусу системи керування електроприводом насосами

Коли навантаження зростає, додатковий насос працює з номінальною швидкістю для підтримання напору. Тим часом основний насос знижує швидкість, щоб компенсувати статичний напір навантаження. Коли напір збільшується до 200% від номінального, резервний насос працює на номінальній швидкості як піковий насос. Швидкі зміни навантаження викликають різкі коливання тиску в мережі. Ці коливання швидко гасяться контуром регулювання тиску. Оскільки регулятор тиску є пропорційним, існує також постійна статична похибка регулювання. Це означає, що коли головний насос завантажений, загальний напір у мережі трохи перевищує розрахунковий напір.

										Арк.
										75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

У разі аварійної зупинки насоса, що працює, система автоматично вмикає резервний агрегат, встановлений паралельно. Система керування оснащена двома магнітними пускачами для кожного двигуна. Це дозволяє запускати двигуни безпосередньо, а насоси обходити ("байпасувати") і тимчасово працювати без зупинки процесу водопостачання в разі виходу з ладу перетворювача частоти або проведення технічного обслуговування. Коли спрацьовує пожежна сигналізація будівлі, система запускає обидва насоси на повну потужність, щоб забезпечити максимальну подачу води, необхідну для гасіння пожежі. Також можливе управління насосом в ручному режимі, в цьому випадку оператор встановлює необхідну частоту обертання ротора двигуна за допомогою ручного задатчика (потенціометра) на передній панелі панелі управління системою. Всі режими роботи та аварійні сигнали мають відповідні світлові індикатори на передній панелі панелі управління.

### 3.4 Монтаж блоку керування на насосній станції

З проведеного раніше аналізу існуючих насосних систем водопостачання було визначено оптимальну схему з трьома електродвигунами. Варіант схеми їх підключення показано на рис. 3.9

Для кращого розуміння монтажу блоку керування електроприводом насосної станції було розроблено загальну насосну станцію на три електродвигуни з баками для води, що знаходяться на загальній рамній основі у програмному середовищі SolidWorks.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

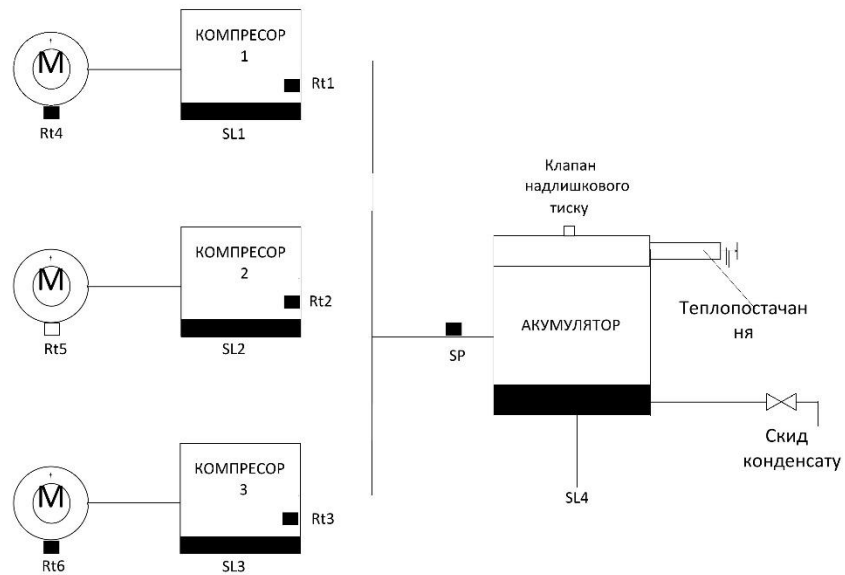


Рисунок 3.12 – Схема варіанту підключення трьох насосів у загальну систему

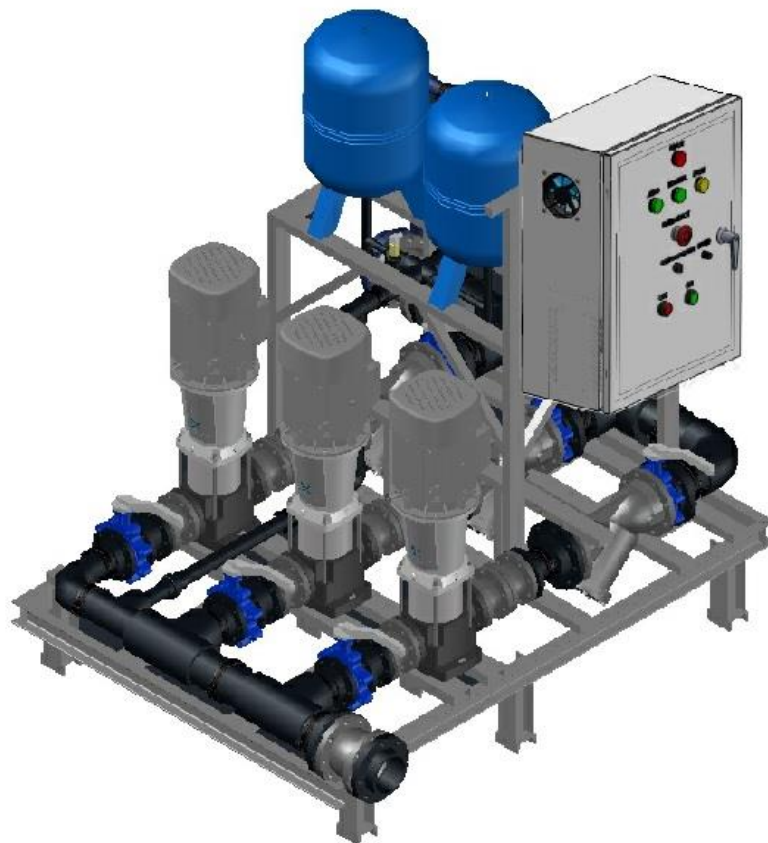


Рисунок 3.10 - Варіант розташування блоку управління електроприводом насосної станції, що складається з трьох електронасосів

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дане розташування блоку керування електроприводом дозволяє змонтувати його компактно і близько до електродвигунів.

### 3.5 Висновки до третього розділу

Було проаналізовано роботу насосної станції. Розроблено електричну схему блока керування електроприводом насосної станції, підібрані частотний перетворювач та реле. Розроблена конструкція блоку керування та змодельоване його оптимальне розташування на насосній станції.

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

В сучасному світі, де технології стрімко розвиваються, сфера водопостачання не залишається осторонь. Автоматизація та управління водопостачанням стають ключовими компонентами для забезпечення ефективності, економії ресурсів та збереження довкілля.

Однією з сучасних тенденцій є впровадження інтелектуальних систем керування водопостачанням. Ці системи використовують передові алгоритми та сенсори для моніторингу та аналізу параметрів водопостачання в реальному часі. Вони автоматично реагують на зміни у використанні води та оптимізують роботу насосів для забезпечення оптимального тиску та розподілу води.

Автоматизовані системи керування також спрямовані на забезпечення енергоефективності. Вони можуть регулювати роботу насосів в залежності від напіру, виключати непотрібні устаткування та оптимізувати графіки роботи для мінімізації споживання електроенергії.

В роботі було проведено необхідний аналіз систем водопостачання. Розглянуто методи керування насосними станціями, схеми підключення.

Обрана схема насосної станції, що містить три асинхронних двигуна.

Відповідно до цього було обрано частотний перетворювач, що може бути запрограмовано програмою керування. Підібрані елементи блоку керування, розроблено електричну схему блоку керування. Створено модель блоку керування електроприводом у програмному середовищі SolidWorks а також модель самої насосної станції.

Розроблений блок керування електроприводом може виявляти витoki та автоматично вимикати подачу води, а також сприяти раціональному використанню ресурсів.

Автоматизація та управління водопостачанням відкривають нові перспективи для ефективного та екологічно чистого використання водних ресурсів. Впровадження такого блоку керування електроприводом насосної

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

станції може призвести до поліпшення систем водопостачання, збільшення ефективності та зменшення впливу на довкілля.

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.
2. C. Copeland and N. Carter, “Energy-Water Nexus : The Water Sector’s Energy Use,” Congressional Reseach Service, 2014
3. Contributions to the design of pumping stations in water distribution networks considering technical, economic, and environmental aspects. Christian Xavier Briceño León. DOCTORAL THESIS. VALENCIA (SPAIN), MARCH 2023. 172 p. URL: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/193080/Briceno%20-%20Contributions%20to%20the%20design%20of%20pumping%20stations%20in%20water%20distribution%20networks%20consider....pdf?sequence=4>
4. Briceño-León, C. X., Sanchez-Ferrer, D. S., Iglesias-Rey, P. L., Martinez-Solano, F. J., & Mora-Melia, D. “Methodology for Pumping Station Design Based on Analytic Hierarchy Process (AHP).” Water, vol. 13, no. 20, pp. 2886, 2021
5. Величко Т.В., Родькин Д.И. Теория электропривода. Часть 1. Механика и характеристики двигателей в электроприводе. / Учебное пособие. – Кременчуг: КПИИ, 1999. – 237 с. (pdf)
6. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1. (djvu)
7. Johnson M.A., Moradi M.H. PID Control. New Identification and Design Methods. — London: Springer, 2005. —544 p.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Кудінов Д.В. Система керування насосною станцією теплової мережі. Кваліфікаційна робота бакалавра. Миколаїв – 2022 URL: [https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2447/1/%D0%9A%D0%A0%D0%91\\_%D0%9A%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B2\\_471\\_2022.pdf](https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2447/1/%D0%9A%D0%A0%D0%91_%D0%9A%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B2_471_2022.pdf)
9. Рижков О. Я. Підвищення енергоефективності електроприводу установки насосної станції подачі холодної води у водопровідну мережу житлового комплексу. Кваліф. Робота магістра. – Вінниця -2020.
10. Павленко В. І. Електромеханічна автоматизована система насосної установки індивідуального теплового пункту. Магістерська дисертація, Київ – 2021 р.
11. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2. (djvu)
12. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993 – 494 с.: іл (djvu)
13. Булгар В.В. Теорія електроприводу: збірник задач. / ОНПУ Одеса: Поліграф, 2006 – 408 с. (djvu). 6. Радимов С.Н. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Одесса. 2007. – 39 с. (djvu)
14. Колб Ант.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навч. посібник. - Д.:НГУ, 2006. - 511 с.
15. Шульга О.В. Автоматизоване керування електроприводами: навчальний посібник. – Полтава: ПолНТУ, 2007 – 293 с.
16. E. Salomons, M. Housh, and M. Asce, “A Practical Optimization Scheme for Real-Time Operation of Water Distribution Systems,” J. Water Resour. Plan. Manag., vol. 146, no. 4, pp. 04020016, 2020.

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. M. Manteigas, A. Andrade-Campos, A. André, and B. Coelho, “Cost-Efficient Algorithms for a Pump Horizon Control in Water Supply System,” *Water Resour. Manag.*, vol. 148, no. 1, pp. 04021091, 2021
18. X. Liu, N. Li, H. Mu, M. Li, and X. Liu, “Techno-energy-economic assessment of a high capacity offshore wind-pumped-storage hybrid power system for regional power system,” *J. Energy Storage*, vol. 41, pp. 102892, 2021.
19. A. V. M. Garcia, P. A. López-Jiménez, F. J. Sánchez-Romero, and M. Pérez-Sánchez, “Objectives, keys and results in the water networks to reach the sustainable development goals,” *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 9, pp. 1268, 2021.
20. S. Beygi, M. Tabesh, and S. Liu, “Multi-Objective Optimization Model for Design and Operation of Water Transmission Systems Using a Power Resilience Index for Assessing Hydraulic Reliability,” *Water Resour. Manag.*, vol. 33, no. 10, pp. 3433–3447, 2019.
21. N. Mehzad and M. Tabesh, “Optimum Reliable Operation of Water Distribution Network Considering Pumping Station and Tank,” *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, vol. 43, no. s1, pp. 413–427, 2019
22. N. Palod, V. Prasad, and R. Khare, “Reliability-based optimization of water distribution networks,” *Water Supply*, vol. 22, no. 2, pp. 2133–2147, 2022.
23. О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, В.В. Козирський, В.Я. Бунько, В.Ю. Рамш; За ред. О.Ю. Синявського. Електропривод та автоматизація – К.: ФОП Ямчинський О.В. 2019. 619с
24. F. Taillandier, S. M. Elachachi, and A. Bennabi, “A decision-support framework to manage a sewer system considering uncertainties,” *Urban Water J.*, vol. 17, no. 4, pp. 344–355, 2020
25. M. Ward, C. Poleacovschi, and M. Perez, “Using AHP and Spatial Analysis to Determine Water Surface Storage Suitability in Cambodia,” *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, pp. 367, 2021

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26. T. L. Saaty, Decision making with dependence and feedback: The analytic network process, Vol. 4922. No. 2. Pittsburgh, RWS publications, 1996.
27. A. R. Simpson and A. Marchi, "Evaluating the Approximation of the Affinity Laws and Improving the Efficiency Estimate for Variable Speed Pumps," J. Hydraul. Eng., vol. 139, no. 12, pp. 1314–1317, 2013.
28. Coelho, Bernardete and Andrade-Campos A. G., "A new approach for the prediction of speed-adjusted pump efficiency curves," J. Hydraul. Res., vol. 54, pp. 586–593, 2016.
29. S. Nair, B. George, H. M. Malano, M. Arora, and B. Nawarathna, "Water-energy-greenhouse gas nexus of urban water systems: Review of concepts, state-of-art and methods," Resour. Conserv. Recycl., vol. 89, pp. 1–10, 2014
30. Hydraulic Institute, Europump, and the US Department of Energy's (D E) Industrial Technologies Program. "Variable speed pumping—A guide to successful applications— Executive Summary." pp. 1-14, 2004
31. S. Bunn, "Pump scheduling optimization in four US cities: Case studies," 8th Annu. Water Distrib. Syst. Anal. Symp. 2006, pp. 78, 2007
32. D. Cohen, U. Shamir, and G. Sinai, "Sensitivity analysis of optimal operation of irrigation supply systems with water quality considerations.," Irrig. Drain. Syst., vol. 18, pp. 227– 253, 2004
33. G. McCormick and R. S. Powell, "Optimal Pump Scheduling in Water Supply Systems with Maximum Demand Charges," J. Water Resour. Plan. Manag., vol. 129, no. 5, pp. 372– 379, 2003
34. L. Cimorelli, A. D'Aniello, and L. Cozzolino, "Boosting Genetic Algorithm Performance in Pump Scheduling Problems with a Novel Decision-Variable Representation," J. Water Resour. Plan. Manag., vol. 146, no. 5, p. 04020023, 2020.
35. C. F. León-Celi, P. L. Iglesias-Rey, F. J. Martínez-Solano, and D. Savic, "Operation of Multiple Pumped-Water Sources with No Storage," J. Water Resour. Plan. Manag., vol. 144, no. 9, p. 04018050, 2018.

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

36. М. Khamudkhanov, I. Abdullabekov, В. Khamudkhanova, К. Dusmatov, and К. Fayzullayev, “Controls of the modes of operation of the pumping station with application of frequency-controlled electric drive Controls of the modes of operation of the pumping station with application of frequency-controlled electric drive,” I P Conf. Ser. Mater. Science Eng., vol. 862, no. 6, pp. 062048, 2020.
37. Т. L. Saaty, “Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy / network processes I,” Eur. J. per. Res., vol. 168, pp. 557–570, 2004
38. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод : навч. посіб. / Б. О. Баховець. – Рівне : НУВГП, 2010. 238 с
39. Частотний перетворювач Bosch Rexroth VFC-3610. URL: <https://systemax.ua/ua/avtomatika/chastotnie-preobrazovateli/vf%D1%81/vfc3610-r912005096.html>

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Лістинг програми для розрахунків

```
import matplotlib.pyplot as plt

class PumpController:
    def __init__(self, num_pumps=3, pump_power=1.0):
        self.num_pumps = num_pumps
        self.pump_power = pump_power
        self.pump_statuses = [False] * num_pumps
        self.water_flow_rate = 0.0

    def turn_on_pump(self, pump_number):
        if 1 <= pump_number <= self.num_pumps:
            self.pump_statuses[pump_number - 1] = True
            print(f"Pump {pump_number} is turned ON.")
        else:
            print("Invalid pump number.")

    def turn_off_pump(self, pump_number):
        if 1 <= pump_number <= self.num_pumps:
            self.pump_statuses[pump_number - 1] = False
            print(f"Pump {pump_number} is turned OFF.")
        else:
            print("Invalid pump number.")

    def calculate_water_flow_rate(self):
        # Your water flow rate calculation logic goes here
```

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

# For simplicity, let's assume a basic calculation
self.water_flow_rate = sum([pump_power for pump_power, status in
zip([self.pump_power]*self.num_pumps, self.pump_statuses) if status])

def plot_water_flow_rate(self):
    plt.plot(range(1, self.num_pumps+1), [self.water_flow_rate]*self.num_pumps,
marker='o')
    plt.xlabel('Pump Number')
    plt.ylabel('Water Flow Rate (m^3/s)')
    plt.title('Water Flow Rate vs Pump Number')
    plt.show()

# Example Usage:
if __name__ == "__main__":
    controller = PumpController()

    controller.turn_on_pump(1)
    controller.turn_on_pump(3)
    controller.calculate_water_flow_rate()
    print(f"Total Water Flow Rate: {controller.water_flow_rate} m^3/s")

    controller.plot_water_flow_rate()

```

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Програма керування 3 електродвигунами насосів водопостачання

```
#include <AsyncStepper.h>
#include <PressureSensorLibrary.h>

const int pump1Pin = 2; // Pin for pump 1
const int pump2Pin = 3; // Pin for pump 2
const int pump3Pin = 4; // Pin for pump 3

const int startButtonPin = 5; // Pin for the start button
const int stopButtonPin = 6; // Pin for the stop button

const int pressureSensorPin = A0; // Pin for the pressure sensor

const float targetPressure = 40.0; // Target pressure value

AsyncStepper pump1, pump2, pump3;
PressureSensor pressureSensor;

void setup() {
  pinMode(startButtonPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(stopButtonPin, INPUT_PULLUP);

  pump1.connectTo(pump1Pin);
  pump2.connectTo(pump2Pin);
  pump3.connectTo(pump3Pin);
```

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

pressureSensor.attach(pressureSensorPin);

Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Check if the start button is pressed
  if (digitalRead(startButtonPin) == LOW) {
    startPumps();
  }

  // Check if the stop button is pressed
  if (digitalRead(stopButtonPin) == LOW) {
    stopPumps();
  }

  // Read pressure value from the sensor
  float currentPressure = pressureSensor.readPressure();

  // Adjust pump speed based on pressure difference
  adjustPumpSpeed(currentPressure);

  // Print pressure value to Serial Monitor
  Serial.print("Current Pressure: ");
  Serial.println(currentPressure);

  delay(100);
}

```

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

void startPumps() {
    pump1.start();
    pump2.start();
    pump3.start();
}

```

```

void stopPumps() {
    pump1.stop();
    pump2.stop();
    pump3.stop();
}

```

```

void adjustPumpSpeed(float currentPressure) {
    // Calculate the difference between current and target pressure
    float pressureDifference = targetPressure - currentPressure;

    // Adjust pump speed based on the pressure difference
    pump1.setSpeed(100 + pressureDifference);
    pump2.setSpeed(100 + pressureDifference);
    pump3.setSpeed(100 + pressureDifference);
}

const int pump1Pin = 2; // Пін для першого насосу
const int pump2Pin = 3; // Пін для другого насосу
const int pump3Pin = 4; // Пін для третього насосу
const int startButtonPin = 5; // Пін для кнопки увімкнення
const int stopButtonPin = 6; // Пін для кнопки вимикання
const int pressureSensorPin = A0; // Пін для датчика тиску
const int targetPressure = 50; // Значення встановленого тиску води

```

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

int currentPressure = 0; // Значення поточного тиску води

void setup() {
  pinMode(pump1Pin, OUTPUT);
  pinMode(pump2Pin, OUTPUT);
  pinMode(pump3Pin, OUTPUT);
  pinMode(startButtonPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(stopButtonPin, INPUT_PULLUP);
  // Ініціалізація інших необхідних компонентів
}

void loop() {
  int startButtonState = digitalRead(startButtonPin);
  int stopButtonState = digitalRead(stopButtonPin);

  if (startButtonState == LOW) { // Якщо кнопка увімкнення натиснута
    // Увімкнути насоси
    digitalWrite(pump1Pin, HIGH);
    digitalWrite(pump2Pin, HIGH);
    digitalWrite(pump3Pin, HIGH);
  } else if (stopButtonState == LOW) { // Якщо кнопка вимкнення натиснута
    // Вимкнути насоси
    digitalWrite(pump1Pin, LOW);
    digitalWrite(pump2Pin, LOW);
    digitalWrite(pump3Pin, LOW);
  }

  // Отримання значень тиску води від датчика
  currentPressure = analogRead(pressureSensorPin);

```

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
// Регулювання насосів залежно від значення тиску
if (currentPressure > targetPressure) {
    // Зменшити потужність насосів для зниження тиску
    // Наприклад, можна використовувати PWM для плавного регулювання
швидкості насосів
} else if (currentPressure < targetPressure) {
    // Збільшити потужність насосів для підвищення тиску
}

// Додаткові регулювання, обробка інших подій та умов
}
```

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		