

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ РІВНЯ
ВОДИ В НАСОСНІЙ СТАНЦІЇ ПЕРШОГО ПІДЙОМУ

Здобувача вищої освіти
Дмитрієва Михайла Максимовича
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та
робототехніка»)

(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., професор Медведєв М.Г.

(підпис)

Національна шкала _____
Кількість балів _____
Оцінка: ECTS

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
 Навчально-науковий інститут муніципального управління
 та міського господарства
 Кафедра Інженерних систем та технологій
 Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
 Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
 робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Завідувач кафедри
 _____ Наталія ОМЕЦІНСЬКА
 « ____ » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
 Дмитрієва Михайла Максимовича

- Тема роботи: Розроблення автоматизованої системи стабілізації рівня води в насосній станції першого підйому
 керівник роботи: д.т.н., професор Медведєв М.Г.
 затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
 від «7» листопада 2025 № 138/1-ОД
- Строк подання студентом роботи: 25.05.2026
- Вихідні дані до роботи: Склад насосної станції першого підйому : чотири насоси 1Д1600-90, потужність двигуна — 160кВт, по— дача — 1000 м³/год, працюючих на одну магістральну трубу подання води на водоочисні споруди.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати будову та експлуатаційні характеристики сучасних твердопаливних котельних агрегатів; Обґрунтувати доцільність впровадження системи автоматичного керування насосним обладнанням на базі векторних перетворювачів частоти; Розробити апаратно-програмну структуру автоматизованої системи моніторингу та диспетчеризації технологічних процесів котельні; Дослідити вплив сучасних мікропроцесорних засобів автоматизації та підвищення енергоефективності теплогенеруючого об'єкта; Провести аналіз вимог охорони праці під час експлуатації електроустановок котельні в надзвичайних ситуаціях.
- Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації
- Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	професор Микола Медведєв		
Розділ 2	професор Микола Медведєв		
Розділ 3	професор Микола Медведєв		
Розділ 4	професор Микола Медведєв		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

<i>№ з/п</i>	<i>Назва етапів бакалаврської роботи</i>	<i>Термін виконання етапів роботи</i>	<i>Заключний документ етапу</i>
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 I розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 II розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 III розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

ЗМІСТ

ВСТУП	07
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ПЕРШОГО ПІДЙОМУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	10
1.1 Загальні відомості про насосні станції та їх технологічне обладнання для перекачування води	10
1.2 Стан і тенденції розвитку систем автоматизованого керування насосними станціями водопостачання	17
1.3 Огляд та аналіз існуючих методів керування насосними станціями водопостачання	20
Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВОДОПОСТАЧАННЯ	28
2.1 Обґрунтування та вибір алгоритму керування насосними агрегатами із застосуванням частотних перетворювачів	28
2.2 Розробка принципової гідравлічної схеми насосної станції відповідно до вимог Технічного завдання на автоматизацію	33
2.3 Структурна організація системи автоматизованого керування насосною станцією водопостачання	35
2.4 Підбір та характеристика засобів автоматизації для побудови САК.....	38
Висновки до розділу №2	53
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	55
3.1 Огляд патентної інформації та технічної літератури	55
3.2 Формування завдання на проектування та аналіз вихідних даних	71
Висновки до розділу 3	81
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	83
4.1 Охорона праці в виробничому приміщенні насосної станції водопостачання комерційного підприємства міста	83
4.2 Заходи та рекомендації для убезпечення персоналу станції водопостачання у випадку надзвичайних ситуацій	90
Висновки до розділу №4	95
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99

АНОТАЦІЯ

Дмитрієв М. М. Розроблення автоматизованої системи стабілізації рівня води в насосній станції першого підйому. – Рукопис.

Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено технічний стан діючої насосної станції та розроблено комплексну систему автоматизованого керування (САК) на основі алгоритму індивідуального частотного регулювання насосних агрегатів. Спроековано модернізовану гідравлічну схему, розроблено 3D-модель інноваційного зворотного клапана, запропоновано апаратну структуру на базі програмованого логічного контролера та створено математичну модель агрегату в середовищі Matlab/Simulink для дослідження динаміки. Практичне значення полягає у можливості впровадження розробленого проекту для забезпечення стабілізації тиску в мережі, суттєвого зниження питомих енерговитрат та підвищення загальної безпеки функціонування об'єкта.

Об'єкт дослідження – функціонуюча насосна станція, головним завданням якої є підвищення тиску холодної води в мережі водопостачання окремого житлового масиву.

Предмет дослідження – технології та методи подачі води в межах централізованої міської системи водопостачання.

Мета роботи – суттєве підвищення показників ефективності, надійності та загальної стійкості системи водопостачання завдяки глибокому впровадженню автоматизованого управління насосною станцією.

Методи дослідження – системний аналіз, математичне моделювання, імітаційне комп'ютерне моделювання, 3D-моделювання.

Ключові слова: насосна станція, автоматизована система керування, частотний перетворювач, програмований логічний контролер, стабілізація тиску, енергоефективність.

ABSTRACT

Dmytriiev M. M. Development of an automated water level stabilization system in a first-lift pumping station. – Manuscript.

Bachelor's qualification thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadsky Taurida National University, Kyiv, 2026.

The bachelor's qualification thesis investigates the technical condition of an operating pumping station and develops a complex automated control system (ACS) based on the algorithm of individual frequency regulation of pumping units. A modernized hydraulic scheme is designed, a 3D model of an innovative check valve is developed, a hardware structure based on a programmable logic controller is proposed, and a mathematical model of the unit is created in the Matlab/Simulink environment for dynamics research. The practical significance lies in the possibility of implementing the developed project to ensure pressure stabilization in the network, significantly reduce specific energy consumption, and increase the overall operational safety of the facility.

The object of research is an operating pumping station, the main task of which is to increase the cold water pressure in the water supply network of a specific residential area.

The subject of research is the technologies and methods of water supply within the centralized municipal water supply system.

The purpose of the work is to significantly improve the efficiency, reliability, and overall stability of the water supply system through the deep implementation of automated control of the pumping station.

Research methods – system analysis, mathematical modeling, computer simulation modeling, 3D modeling.

Keywords: pumping station, automated control system, frequency converter, programmable logic controller, pressure stabilization, energy efficiency.

ВСТУП

На сьогоднішній день переважна більшість сучасних підприємств, до зони відповідальності яких належить експлуатація насосних станцій водопостачання, активно досліджують та реалізують шляхи інтеграції автоматизованих алгоритмів керування. Подібний підхід вже перетворився на передову практику, насамперед для комерційних організацій у цій галузі, які успішно експлуатують багатофункціональні комплекси автоматизованого управління технологічним устаткуванням. Тим не менш, питання щодо підсумкової ефективності та якості впроваджених інженерних рішень постійно залишається предметом фахових дискусій, оскільки кожна система характеризується індивідуальними потребами та унікальними експлуатаційними умовами.

Ступінь актуальності впровадження засобів автоматизації у цій сфері є надзвичайно високим і не підлягає сумнівам. Експлуатація обладнання за умов відсутності автоматизованих систем або при їх вкрай недостатньому рівні розвитку неминуче тягне за собою низку критичних проблем. Серед них варто виділити вкрай нераціональне споживання електричної енергії, асиметричне навантаження на насосні агрегати та виникнення перехідних процесів, які мають небажаний інерційний та нерівномірний характер. Крім того, відсутність автоматики унеможливорює своєчасне та оперативне реагування на будь-які системні зміни в режимі реального часу, що, у свою чергу, підвищує ризик виникнення серйозних аварійних ситуацій і призводить до суттєвого зростання фінансових витрат на проведення ремонтних робіт та поточне обслуговування.

Впровадження комплексних систем автоматизації на насосних станціях водопостачання відіграє ключову роль у пролонгації терміну служби технологічного обладнання та повній мінімізації ризиків аварійних збоїв. Такі модернізаційні заходи значно підвищують загальний рівень надійності та стабільності подачі води кінцевим споживачам. Додатковою і вкрай важливою перевагою є оптимізація економічних показників об'єкта: відбувається відчутне

зниження різноманітних витрат, зокрема операційних та експлуатаційних витрат, а також витрат на оплату електроенергії, що в сукупності гарантує максимально ефективне та раціональне управління всіма технологічними процесами.

Як об'єкт дослідження в межах цієї роботи розглядається функціонуюча насосна станція, головним завданням якої є підвищення тиску холодної води в мережі водопостачання окремого житлового масиву. Цей процес розглядається відносно базового рівня тиску води, яка надходить до станції безпосередньо з міської централізованої магістралі.

Зазвичай об'єкти такого типу оснащуються групою насосних агрегатів, з'єднаних за паралельною схемою включення один відносно іншого. Залежно від мінливих ситуацій та поточних експлуатаційних потреб, ці агрегати вимагають забезпечення максимально злагодженої та синхронізованої роботи. Це включає в себе пропорційний та рівномірний розподіл моторесурсу між пристроями та гарантування безперервного, плавного переходу між різноманітними режимами їх спільного функціонування. Зазначена проблематика продовжує залишатися гострою та актуальною для значної кількості діючих насосних станцій, оскільки управління ними і досі базується на морально застарілих та економічно неефективних методологіях.

Предметом даного дослідження виступають безпосередньо технології та методи подачі води в межах централізованої міської системи водопостачання.

Основна мета роботи зводиться до суттєвого підвищення показників ефективності, надійності та загальної стійкості системи водопостачання. Досягнення цієї мети планується реалізувати завдяки глибокому впровадженню автоматизованого управління насосною станцією, що базується на використанні передових, сучасних та інноваційних технологічних рішень.

Задля успішної реалізації поставленої мети передбачається розробка комплексної системи автоматизованого керування (САК) насосною станцією. Процес розробки обов'язково враховуватиме специфічні гідроенергетичні характеристики наявних насосних агрегатів, детальні алгоритми їх синхронної роботи та базові параметри самої системи водопостачання. Крім того,

планується всебічно дослідити функціонування створеної САК з використанням розробленої математичної динамічної моделі, що дозволить об'єктивно оцінити підсумкову ефективність запропонованої системи.

У контексті сформульованої мети, в ході виконання кваліфікаційної роботи необхідно послідовно вирішити такий комплекс завдань:

1. Здійснити детальне обстеження насосної станції та провести глибокий аналіз її поточного технічного стану з метою чіткого визначення необхідних масштабів та об'ємів подальшої автоматизації.

2. Сформулювати базову концепцію САК, яка спиратиметься на найбільш раціональний та ефективний спосіб управління насосними агрегатами для гарантованого підтримання заданого рівня тиску води в мережі житлового масиву.

3. Розробити розгорнуте завдання на проектування САК насосної станції, спираючись на отримані результати аналізу поточного стану, затверджену концепцію управління та деталізоване технічне завдання, надане комерційним підприємством, у підпорядкуванні якого знаходиться даний об'єкт.

4. Здійснити безпосередню розробку системи автоматизованого керування у суворій відповідності до всіх нормативних вимог розробленого завдання на проектування.

5. Створити адекватну математичну модель розробленої САК насосною станцією для дослідження її динамічних властивостей.

6. Провести всебічне дослідження створеної математичної моделі з використанням інструментарію прикладного програмного середовища Matlab/Simulink.

7. Виконати ґрунтовний аналіз та детальну інтерпретацію отриманих результатів моделювання, на основі яких провести кінцеву оцінку загальної ефективності впровадженої САК.

8. Спроекувати та розробити спеціалізоване програмне забезпечення, призначене для безперервного моніторингу параметрів та оперативного керування насосною станцією.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ПЕРШОГО ПІДЙОМУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

1.1 Загальні відомості про насосні станції та їх технологічне обладнання для перекачування води

Сучасні насосні станції являють собою високотехнологічні та багатокомпонентні інженерні комплекси, які інтегрують у собі різноманітні електрогідравлічні споруди та спеціалізоване устаткування. Головне функціональне призначення цих комплексів полягає у забезпеченні безперервного процесу трансформації спожитої електричної енергії в кінетичну та потенційну (механічну) енергію потоку рідини, а також у всебічному керуванні та контролі за цим процесом. Система класифікації насосних станцій є надзвичайно розгалуженою та базується на множині критеріїв, серед яких визначальними факторами виступають галузь практичного застосування, конструктивні особливості споруд, специфічні технологічні вимоги до параметрів середовища, що перекачується, а також нюанси монтажу та просторового розміщення обладнання.

Якщо розглядати насосні станції з точки зору їх цільового призначення, їх прийнято диференціювати на декілька основних категорій. До першої групи належать водопровідні станції, які спроектовані спеціально для транспортування чистої питної або технічної води (як холодної, так і гарячої) до кінцевих споживачів. Іншим важливим типом є каналізаційні, або водовідвідні, станції, головною функцією яких виступає перекачування побутових, промислових або зливових стічних вод у напрямку очисних споруд. Крім того, виділяють дренажні станції, що призначені для ефективного відведення надлишкових об'ємів ґрунтових або поверхневих вод з метою осушення територій.

Залежно від місця розташування в загальній архітектурі системи водопостачання та виконуваної технологічної ролі, насосні станції класифікують

на наступні типи. Початковою ланкою системи є насосні станції першого підйому, чия задача полягає в заборі води безпосередньо з природного або штучного джерела (річки, свердловини, водосховища) та її подальшому транспортуванні на станції водопідготовки. У випадках, коли якість вихідної води відповідає нормам і очищення не вимагається, вода може подаватися транзитом безпосередньо у магістральну мережу або акумулюючі резервуари. Наступним етапом є насосні станції другого підйому, які відповідають за перекачування вже очищеної та підготовленої води з резервуарів чистої води безпосередньо у розгалужену водопровідну мережу міста або підприємства. Окремо виділяють циркуляційні насосні станції, що знаходять своє застосування переважно у складних системах оборотного водопостачання на великих промислових об'єктах та теплових електростанціях, забезпечуючи безперервний рух охолоджувальної або технологічної води по замкнутому контуру. Також існують підвищувальні насосні станції, або станції підкачки, головне завдання яких полягає в локальному підвищенні гідростатичного напору в розподільчих мережах окремих міських районів або на специфічних ділянках протяжних водоводів, причому забір води такі станції здійснюють не з джерел, а безпосередньо з існуючої водопровідної мережі.

Саме станції підвищення тиску відіграють критичну роль у забезпеченні стабільного та комфортного водопостачання багатоповерхової житлової забудови, яка підключена до централізованих магістралей. Вони ефективно нівелюють проблему недостатнього або сильно змінного тиску холодної та гарячої води, що виникає внаслідок значних добових коливань обсягів водоспоживання, особливо коли пропускна здатність існуючої інфраструктури не відповідає різким піковим навантаженням. Найбільш гостро ця проблема проявляється в години максимального розбору води, коли фіксується масове та одночасне відкриття точок водорозбору в квартирах. Для вирішення цієї проблеми підвищувальні станції найчастіше інсталиуються безпосередньо в житлових кварталах, у безпосередній близькості до висотних будівель, що гарантує підтримку нормативного тиску навіть на найвищих поверхах.

Зважаючи на вимоги щодо безперебійності роботи та рівня надійності, насосні станції поділяються на три основні категорії. Станції першої категорії надійності експлуатуються в умовах, де будь-які перерви в роботі насосного обладнання є абсолютно неприпустимими, що насамперед стосується об'єктів стратегічного призначення, систем пожежогасіння та виробництв з безперервним циклом. Для станцій другої категорії надійності регламент допускає короткочасні зупинки в подачі води, як правило, на час, необхідний для ручного або автоматичного включення резервних агрегатів. У свою чергу, станції третьої категорії надійності допускають можливість більш тривалих перерв у водопостачанні під час ліквідації аварійних ситуацій, однак цей період не повинен перевищувати двадцяти чотирьох годин.

За архітектурно-будівельними рішеннями, особливостями конструкції та глибиною закладення машинних залів розрізняють наземні станції, де все обладнання розміщується на рівні поверхні землі або вище. Також існують напівзаглиблені станції, в яких машинний зал частково заглиблений у ґрунт, зазвичай на глибину до трьох-чотирьох метрів. Крім того, проектується заглиблені, або шахтні, станції, де технологічне обладнання розміщується на значній глибині, що становить близько восьми метрів і більше.

Важливим критерієм класифікації є принцип управління роботою станції, оскільки система керування повинна бути максимально надійною та зручною в експлуатації. Вибір конкретного режиму залежить від масштабу об'єкта, його віддаленості та складності технологічного процесу. Застосовується ручне керування, при якому всі операції з пуску, зупинки та регулювання режимів роботи насосів виконуються безпосередньо черговим персоналом. Альтернативою є автоматичне керування, за якого функціонування станції відбувається без втручання людини, а процесом керує локальна автоматика на основі сигналів від вимірювальних приладів, таких як датчики рівня, реле тиску чи витратоміри. Також впроваджується напівавтоматичне керування, коли пуск системи здійснюється оператором, після чого підтримка заданих параметрів відбувається в автоматичному режимі. Сучасним рішенням є дистанційне, або телемеханічне, керування, яке дозволяє управляти агрегатами та контролювати

їх стан диспетчером з віддаленого пульта управління, розташованого поза межами самої станції. Оптимальний метод керування визначається на етапі проектування, базуючись на комплексному обстеженні об'єкта, техніко-економічному обґрунтуванні та вимогах технічного завдання.

Якщо класифікувати насосні станції за типом основного перекачувального обладнання, то виділяють станції, обладнані осьовими та діагональними пропелерними насосами, які можуть мати як горизонтальне, так і вертикальне виконання. Інший тип — це станції, що використовують насоси об'ємного типу, зокрема поршневі або гвинтові. Також існують станції, оснащені різноманітними водопідіймальними пристроями, наприклад, ерліфтами. Найбільш поширеними є станції, укомплектовані відцентровими лопатевими насосами різної просторової орієнтації, тобто горизонтальними або вертикальними.

У сучасній практиці проектування та будівництва систем водопостачання домінуючі позиції займають саме відцентрові насоси, висока популярність яких пояснюється цілою низкою вагомих техніко-економічних переваг. До них належить відносно низька питома вартість обладнання в перерахунку на одиницю створюваного напору або об'єму подачі, а також високі значення коефіцієнта корисної дії. Ці агрегати відрізняються доведеною роками експлуатації високою надійністю та значним ресурсом безвідмовної роботи. Ринок пропонує надзвичайно широку номенклатуру моделей та варіантів конструктивного виконання відцентрових насосів, які поєднують загальну простоту внутрішньої будови з високою ефективністю перекачування. Вони здатні працювати в дуже широкому спектрі параметрів, від мінімальних до величезних значень витрати та напору. Важливою особливістю є пологість робочої характеристики, що означає відносно незначні коливання напору при зміні обсягів подачі води в робочій зоні. Крім того, відцентрові насоси характеризуються високою ремонтпридатністю, невибагливістю у технічному обслуговуванні та здатністю забезпечувати рівномірну подачу рідини без суттєвих гідравлічних пульсацій у трубопроводах. Вагомим плюсом є також зручність їх інтеграції в складні гідравлічні схеми, що надає можливість

паралельного підключення для збільшення сумарної витрати, або послідовного для кратного збільшення напору.

Типова внутрішня будова класичного відцентрового насоса детально проілюстрована на рисунку 1.1.

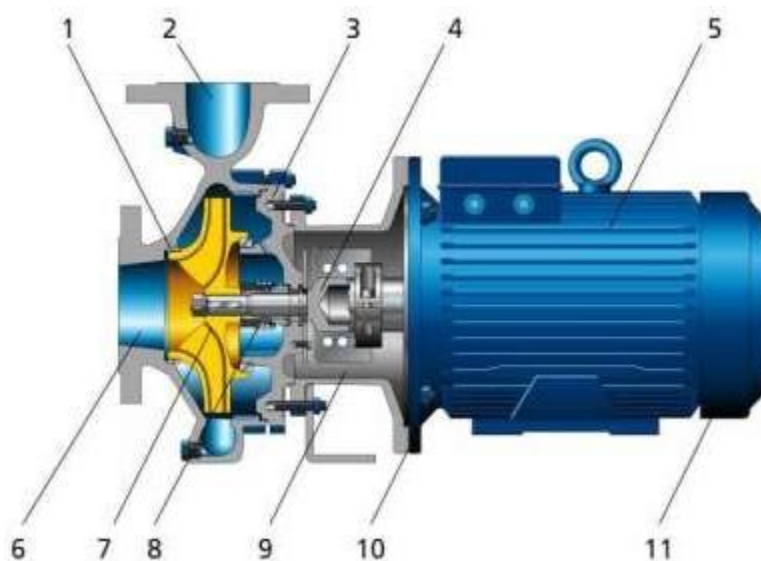


Рисунок 1.1 – Конструктивна схема відцентрового горизонтального насоса односекційного типу, де: 1 – зазор для дроселювання; 2 – патрубок нагнітання (вихідний); 3 – внутрішня робоча камера; 4 – приводний вал електричного двигуна; 5 – захисний корпус двигуна; 6 – патрубок всмоктування (вхідний); 7 – колесо робоче (крильчатка); 8 – система гідравлічного ущільнення валу; 9 – опорний піддон приводного механізму; 10 – монтажно-з'єднувальний фланець; 11 – зовнішній захисний кожух.

Фізичний принцип дії насоса відцентрового типу базується на послідовному алгоритмі. Робочий цикл починається з того, що внутрішня камера раавлика, де розміщене робоче колесо, повністю заповнюється перекачуваною рідиною. При подачі живлення на двигун колесо починає інтенсивно обертатися, а його профільовані лопаті захоплюють масу рідини, надаючи їй обертального руху. Внаслідок швидкого обертання виникають потужні відцентрові сили, які відкидають маси рідини від центру колеса до периферії, тобто до внутрішніх стінок корпусу. Цей процес призводить до різкого зростання кінетичної енергії та тиску на краях камери, завдяки чому рідина з силою виштовхується в нагнітальний трубопровід. Одночасно з процесом виштовхування води на

периферії, у центральній частині робочого колеса біля осі обертання формується зона сильного розрідження або вакууму. Різниця тисків між атмосферою чи підпором у вхідній магістралі та розрідженою зоною в центрі насоса змушує нову порцію рідини безперервно всмоктуватися через вхідний патрубок.

Візуальне представлення зовнішнього вигляду класичних горизонтальних відцентрових насосних агрегатів як у базовому односекційному, так і у багатосекційному виконанні наведено на рисунках 1.2а та 1.2б відповідно.



1.2 а – Насос в односекційному виконанні



1.2 б – Насос у багатосекційному (багатоступеневому) виконанні

Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд типових відцентрових насосів горизонтального типу.

Відповідно, візуальне представлення вертикальних відцентрових насосних установок також у варіантах з однією та декількома секціями продемонстровано на рисунках 1.3а та 1.3б. Під час розробки проектної документації для нових або реконструйованих насосних станцій інженери все частіше віддають перевагу насосам вертикального багатосекційного типу через їхню здатність генерувати дуже високі напори рідини навіть при відносно невеликих обсягах подачі, а

вертикальна орієнтація валу дозволяє значно оптимізувати використання простору машинного залу.



1.3 а – Вертикальний насос одnoseкційний



1.3 б – Вертикальний насос багатосекційний

Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд типових відцентрових насосів вертикального компонування

Для коректного вибору та розрахунку роботи насосного обладнання використовуються ключові гідравлічні та енергетичні характеристики. Основною є подача або продуктивність (Q), яка відображає об'ємну кількість

рідини, що насос здатний перемістити в напірний трубопровід за певну одиницю часу, і вимірюється переважно в кубічних метрах на годину або літрах за секунду. Наступною характеристикою є напір (Н) — приріст питомої механічної енергії рідини, яку вона отримує при проходженні через насос; ця величина виражається у метрах водяного стовпа і фізично означає висоту, на яку насос здатен підняти перекачуване середовище. Зв'язок між ними описує напірно-витратна характеристика, яка є графічною залежністю, що наочно демонструє зміну створюваного напору при зміні об'ємної подачі насоса за умови незмінної частоти обертання валу. Для визначення фактичних параметрів використовується робоча точка насоса, що являє собою точку перетину графіків характеристики самого насоса та гідравлічної характеристики зовнішньої трубопровідної мережі. З точки зору енергетики розглядається корисна потужність (N_u), тобто енергія, що безпосередньо передається рідині насосом за одиницю часу, яка розраховується як добуток густини, прискорення вільного падіння, подачі та напору ($N_u = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$) і вимірюється у Ватах або кіловатах. Для забезпечення цієї енергії до валу насоса від електродвигуна підводиться потужність на валу (N_w), яка завжди більша за корисну потужність через наявність механічних та гідравлічних втрат ($N_w = N_u / \eta$). Загальну енергетичну ефективність відображає коефіцієнт корисної дії (η), який визначається як відношення корисної потужності до потужності на валу і виражається у відсотках. Крім того, враховується номінальний тиск (PN), який є максимально допустимим надлишковим тиском всередині корпусу насоса, при якому гарантується його безпечна та тривала експлуатація, а також номінальний діаметр (DN), що вказує на стандартний умовний прохід всмоктувального та нагнітального патрубків, необхідний для підбору відповідної фланцевої арматури [5].

1.2 Стан і тенденції розвитку систем автоматизованого керування насосними станціями водопостачання

Проведення глибокого аналізу сучасних тенденцій у сфері модернізації та розвитку комплексів автоматизації процесів водопостачання однозначно вказує

на те, що пріоритетним та найбільш гострим питанням на сьогоднішній день виступає проблема енергозбереження. У структурі загальних експлуатаційних витрат саме насосні станції (зокрема, об'єкти другого та наступних рівнів підйому) виступають ключовими споживачами електричної енергії в усій системі водоканалу. На поточний момент кожна інжинірингова компанія або окремий розробник систем автоматизації намагається вирішувати це складне завдання самотійно, спираючись переважно на власні емпіричні напрацювання та практичний досвід. Водночас, фундаментальною перепорою на шляху до масового та ефективного впровадження новітніх енергозберігаючих технологій залишається критично низький загальний ступінь автоматизації технологічних процесів, який історично притаманний більшості вітчизняних систем комунального водопостачання.

У світовій та вітчизняній інженерній практиці під час проектування та створення автоматизованих комплексів водопостачання традиційно сформувалися і застосовуються два базові концептуальні підходи. Перший напрямок орієнтований на макрорівень та передбачає реалізацію оптимального диспетчерського керування гідравлічними режимами в розподільчих абонентських мережах. Другий підхід зосереджений на локальному рівні та має на меті безпосереднє автоматизоване управління насосним та супутнім устаткуванням конкретної станції. Незважаючи на активний розвиток галузі, станом на сьогодні уніфіковані та загальноприйняті принципи побудови комплексних енергозберігаючих систем управління водопостачанням досі перебувають на стадії формування. Проте вже цілком очевидно є гостра необхідність застосування комплексного, системного підходу. Тільки така стратегія, що базується на тісній інтеграції новітніх засобів обчислювальної техніки та передових інформаційних технологій управління, здатна забезпечити по-справжньому ефективне розв'язання проблеми оптимізації енергоспоживання.

Характерною особливістю функціонування будь-яких систем комунального водопостачання є наявність яскраво виражених добових, тижневих, а також сезонних нерівномірностей у графіках споживання води. Такі динамічні коливання витрати неминуче призводять до того, що фактичні режими

експлуатації насосних агрегатів періодично виходять за межі їхніх номінальних робочих характеристик (зон з максимальним коефіцієнтом корисної дії). Цей фактор об'єктивно зумовлює технологічну необхідність постійного і точного регулювання таких вихідних параметрів, як продуктивність (подача) та тиск (напір), що генеруються насосними установками. Варто зазначити, що класичні, традиційні методики регулювання — зокрема, дроселювання потоку за допомогою засувки на напірних магістралях або ж дискретна зміна кількості паралельно працюючих агрегатів — є морально застарілими. Такі способи управління відзначаються вкрай низькою ефективністю та практично повністю ігнорують сучасні вимоги щодо оптимізації витрат енергії під час транспортування водних мас.

На противагу застарілим підходам, сьогодні домінуючим вектором та основною глобальною тенденцією в контексті енергозбереження на об'єктах водопостачання є масове впровадження керованих приводних систем. Практичний експлуатаційний досвід переконливо доводить, що підсумкова якість реалізованих алгоритмів керування, загальний рівень інтелектуалізації автоматики та реальний енергозберігаючий потенціал всієї системи управління знаходяться у безпосередній залежності від наявності електроприводів насосів із можливістю плавного регулювання їхньої продуктивності.

Сучасні апаратно-програмні комплекси автоматизації водопостачальних об'єктів стандартно комплектуються широким спектром високоточних первинних перетворювачів та надійними засобами безперервного контролю ключових технологічних параметрів. Наявність такої розгалуженої інформаційно-вимірювальної інфраструктури створює міцне та повноцінне підґрунтя для розробки і впровадження високоефективних автоматизованих систем інтелектуального енергозберігаючого управління всім технологічним обладнанням насосних станцій.

Підсумовуючи вищевикладене, можна стверджувати, що суттєве зниження питомого енергоспоживання в інфраструктурі систем водопостачання є абсолютно реальним та досяжним завданням. Ключовими інструментами для його успішної реалізації виступають подальше глибоке вдосконалення

математичних методів та алгоритмів управління технологічними процесами, а також активне і повсюдне застосування інноваційних інформаційно-керуючих технологій [1].

1.3 Огляд та аналіз існуючих методів керування насосними станціями водопостачання

Процес керування насосними станціями водопостачання, по своїй суті, зводиться насамперед до безперервного та точного управління експлуатаційними режимами роботи наявних насосних агрегатів. Головною метою цього процесу є гарантоване забезпечення необхідного рівня гідростатичного напору та стабільної подачі води в межах усієї гідравлічної системи. Ця задача стає особливо складною і важливою в умовах постійних та непередбачуваних змін загального гідравлічного опору, що виникають у різноманітних сегментах та елементах розподільчої мережі водопостачання, за обслуговування якої відповідає конкретна насосна станція.

У сучасній інженерній практиці та гідравліці традиційно виділяють та застосовують чотири основні технологічні способи регулювання продуктивності (подачі) роботи насосних агрегатів:

1. Метод дроселювання потоку рідини.
2. Метод рециркуляції (також відомий як байпасування або перепуск).
3. Метод зміни частоти обертання приводного валу насосного агрегата.
4. Метод регулювання з використанням гідродинамічних муфт (гідромуфт).

Для забезпечення більш наочного та глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються під час застосування кожного з методів регулювання, нижче будуть наведені відповідні графічні ілюстрації, які відображають взаємодію напірно-витратних характеристик насоса та гідравлічної системи.

Під регулюванням параметрів роботи насоса за допомогою методу дроселювання мається на увазі штучна та цілеспрямована зміна загального гідравлічного опору робочої системи. Цей ефект досягається переважно за

рахунок зміни ступеня відкриття відповідної запірно-регулюючої арматури (засувки, вентилів, клапанів), що встановлена на напірному трубопроводі.

На рисунку 1.4 представлено графічну діаграму, яка детально ілюструє фізичний зміст процесу регулювання робочих параметрів насоса за допомогою дроселюючої засувки.

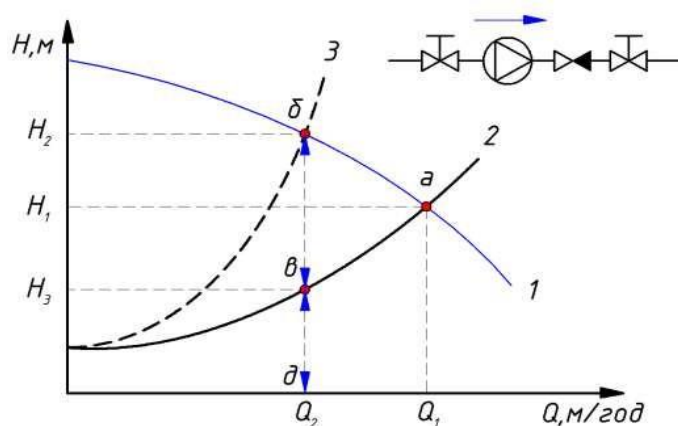


Рисунок 1.4 – Графічна інтерпретація процесу регулювання продуктивності насоса методом дроселювання напірної лінії

У випадку, коли вся регулююча арматура знаходиться у повністю відкритому положенні і жодним чином не впливає на базові характеристики гідравлічної мережі, розрахунковий режим роботи насоса буде стабільно відповідати точці, позначеній як «а» (номінальна робоча точка). Якщо ж виникає потреба зменшити подачу і регулюючий елемент (засувка) частково перекриває переріз труби, то загальний гідравлічний опір в системі закономірно зростає. Відповідно до характеристики відцентрового насоса, зменшення подачі супроводжується підвищенням створюваного ним напору. За таких умов нова робоча точка насоса зміститься вгору по кривій і буде відповідати положенню «б». Проте, варто звернути увагу на важливий нюанс: для того, щоб просто забезпечити системі необхідну зменшену подачу Q_2 , цілком достатньо було б, щоб насос генерував напір на рівні H_3 (згідно з базовою характеристикою мережі). Але, як чітко видно з наведеного графіка, насос при зменшеній подачі Q_2 вимушено розвиває значно більший напір — H_2 . Це означає, що в системі виникає так званий надлишковий напір, величину якого можна розрахувати як різницю: $\Delta H = H_2 - H_3$. Наявність цього надлишкового напору свідчить про прямі та безповоротні втрати механічної енергії потоку, які витрачаються на подолання

штучно створеного місцевого опору в дроселюючому пристрої (засувці). Таким чином, можна зробити висновок: хоча метод дроселювання дозволяє досить просто і без значних початкових капіталовкладень реалізувати управління продуктивністю насосної станції, в довгостроковій перспективі він призводить до колосальних фінансових втрат через постійну та нераціональну перевитрату електричної енергії.

Суть методу регулювання насоса за допомогою рециркуляції полягає в тому, що певна, чітко дозована частина об'єму води, яка вже пройшла через насос і знаходиться зі сторони нагнітального патрубка, примусово повертається (перепускається) назад у всмоктувальний трубопровід (на вхід насоса). Для цього створюється спеціальний обвідний контур (байпас), який підключається паралельно до самого насоса і характеризується відносно низьким гідравлічним опором.

На рисунку 1.5 наведено графічну побудову, яка наочно пояснює принцип дії процесу регулювання насоса з використанням обвідної лінії (байпасування).

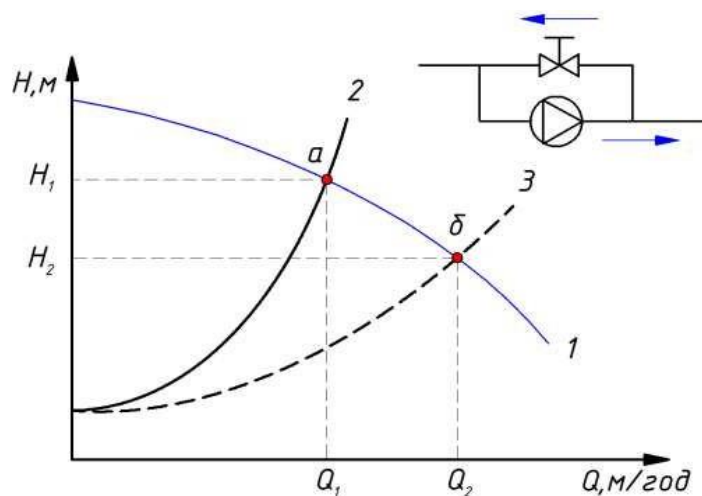


Рисунок 1.5 – Графічна інтерпретація процесу регулювання продуктивності насоса методом рециркуляції (байпасування)

Аналогічно до попередньо розглянутого випадку, початковий режим роботи насоса за умови повністю закритої лінії рециркуляції (відсутність регулювання) відповідає робочій точці «а».

Процес відкриття регулюючого клапана або заслінки, встановленої на лінії рециркуляції, призводить до того, що сумарна витрата води, яка фактично проходить через колесо насоса, збільшується. Відповідно до власної напірно-

витратної характеристики насосного агрегату, збільшення його власної подачі неминуче призводить до зниження створюваного ним напору в загальній гідравлічній системі. Саме це зниження напору дозволяє досягти кінцевої мети — зменшити обсяг подачі води безпосередньо у споживчу мережу до необхідного, заздалегідь визначеного значення.

З точки зору гідравліки, відкривання регулюючої арматури на байпасі означає, що насос починає працювати на нову, еквівалентну гідравлічну систему, сумарні характеристики якої (крутизна параболи) суттєво відрізняються від характеристик початкової мережі водопостачання, безпосередньо приєднаної до станції.

За умови, що гідравлічний опір самої розподільчої мережі залишається постійним, підтримання регулятором заданого (зниженого) рівня напору, подібно до методу дроселювання, забезпечує досягнення необхідної величини подачі у споживача, що на графіку відповідає робочій точці «б».

Однак, головним недоліком методу рециркуляції є те, що він супроводжується значними додатковими та абсолютно нераціональними витратами електричної енергії. Ці втрати напряду пов'язані з необхідністю постійного перекачування певного «паразитного» об'єму води по замкнутому контуру через лінію рециркуляції, величина якого визначається різницею: $Q_{\text{рец}} = Q_1 - Q_2$.

Наступний метод передбачає регулювання вихідних параметрів насосного агрегату шляхом безпосередньої зміни частоти обертання валу його електричного приводу. У цьому випадку власна напірно-витратна характеристика насоса зберігає свою загальну параболічну форму, але динамічно змінює своє положення в системі координат, зсуваючись вище або нижче відносно базової характеристики, яка відповідає номінальній (паспортній) частоті обертання електродвигуна.

На рисунку 1.6 продемонстровано сімейство характеристик, що ілюструють високоефективний процес регулювання насоса за рахунок частотного керування обертами його приводного механізму.

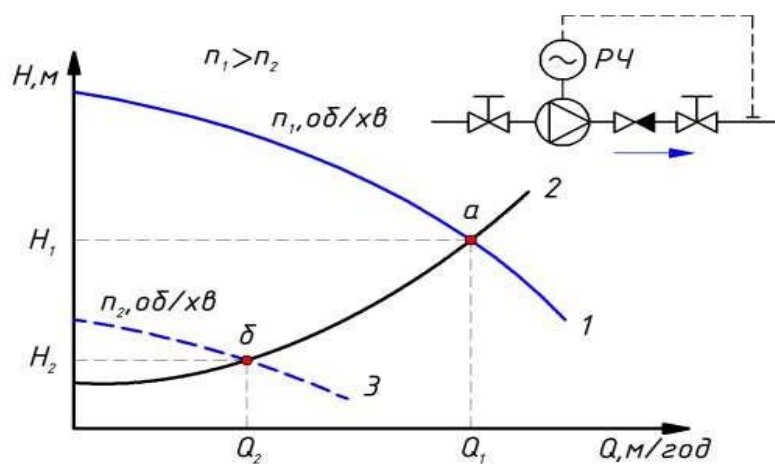


Рисунок 1.6 – Графічна інтерпретація процесу регулювання продуктивності насоса методом зміни частоти обертання його валу

Як можна спостерігати на рисунку 1.6, у разі відсутності будь-якого втручання в режим роботи мережі та насоса (робота на номінальних обертах), їх спільна робоча точка позиціонується в координатах "а", при цьому фактична подача води значно перевищує реально необхідний споживачеві рівень Q_2 . Впровадження в схему перетворювача частоти (інвертора) дозволяє плавно змінювати робочу криву насоса таким чином, щоб точка її перетину з незмінною характеристикою зовнішньої мережі змістилася точно в положення "б". Саме в цій точці фактична подача води в систему ідеально відповідає необхідному, оптимальному рівню. Принципово важливим моментом є те, що ця нова робоча точка "б" розташовується на природній характеристиці насоса, знятій при зниженій частоті обертання валу (наприклад, n_2). Завдяки цьому, штучно створені гідравлічні опори відсутні, а отже, енергетичні втрати потужності на сам процес регулювання зводяться практично до нуля, що робить цей метод максимально енергоефективним.

Останній з розглянутих методів — регулювання роботи насоса із застосуванням гідродинамічної муфти. Цей пристрій забезпечує можливість плавної зміни числа обертів безпосередньо робочого колеса (або групи коліс) насоса, при цьому частота обертання валу головного електродвигуна залишається постійною та незмінною. Детальна внутрішня будова типової гідромуфти схематично зображена на рисунку 1.7.

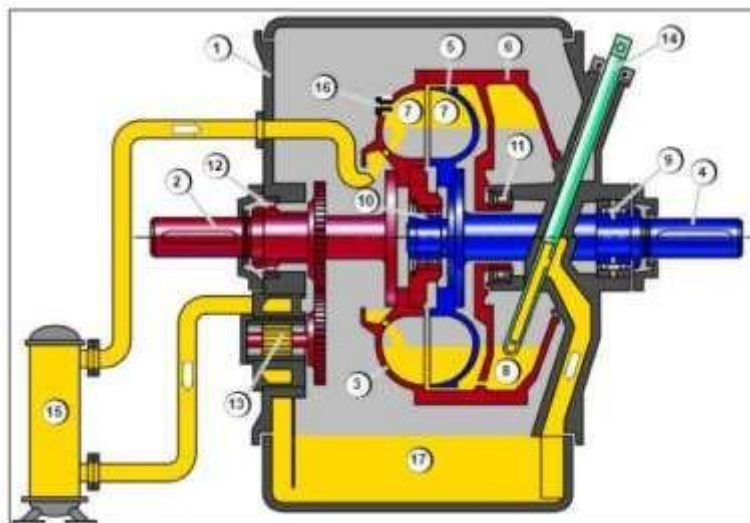


Рисунок 1.7 – Конструктивна схема та принцип дії гідродинамічної муфти

Принцип роботи системи з гідروмуфтою виглядає наступним чином. Електричний двигун жорстко з'єднаний і приводить у постійний обертальний рух ведуче (первинне) колесо 3 (насосне колесо) гідромуфти. Механічна потужність від двигуна передається робочій рідині (спеціальному маслу), яка знаходиться в порожнині муфти. Масло, потрапляючи на лопаті первинного колеса, розганяється під дією відцентрових сил, завдяки чому отримує кінетичну енергію, тобто механічна енергія обертання трансформується в енергію руху потоку рідини. Далі цей прискорений потік масла спрямовується на ведене (друге) колесо 5 (турбінне колесо). Це колесо працює в режимі турбіни: воно поглинає кінетичну енергію потоку масла, починає обертатися і знову перетворює гідравлічну енергію назад у механічну енергію обертання валу, з яким жорстко з'єднаний насос. Ступінь передачі крутного моменту залежить від об'єму масла в муфті. При максимальному заповненні муфти робочою рідиною обидва колеса обертаються практично синхронно (з мінімальним ковзанням), і частота обертання валу насоса майже дорівнює частоті обертання валу двигуна. Якщо ж необхідно зменшити продуктивність насоса, частину масла відкачують з робочої порожнини муфти. Це призводить до посилення ефекту так званого гідродинамічного проковзування між насосним (3) та турбінним (5) колесами, внаслідок чого частота обертання турбінного колеса і, відповідно, робочого колеса відцентрового насоса плавно зменшується.

Варто відзначити, що впровадження методу регулювання насосних агрегатів за допомогою гідромуфт є технічно та економічно обґрунтованим виключно на насосних станціях дуже великої потужності та продуктивності. Як правило, їх доцільно встановлювати на потужні насосні агрегати, номінальна електрична потужність яких перевищує 500 кВт. У сфері комунального водопостачання міст, де переважно експлуатуються насосні станції малої та середньої потужності, такий специфічний і громіздкий спосіб управління продуктивністю на практиці майже ніколи не застосовується.

Проведення комплексного техніко-економічного порівняння всіх чотирьох описаних способів керування роботою насосних агрегатів дозволяє зробити однозначний висновок. Найбільш прогресивним, раціональним та економічно виправданим на сьогоднішній день є метод керування параметрами насоса за допомогою плавної зміни швидкості обертання валу його електроприводу (з використанням частотних перетворювачів).

Висновки до розділу 1

На основі проведеного в першому розділі аналізу насосної станції як об'єкта автоматизації та огляду існуючих систем керування можна зробити низку важливих висновків. Під час порівняння основних способів регулювання роботи відцентрових насосних агрегатів, таких як дроселювання, рециркуляція, застосування гідродинамічних муфт та зміна частоти обертання валу електродвигуна, було доведено беззаперечну перевагу останнього. Техніко-економічний аналіз показав, що керування за допомогою плавної зміни швидкості обертання із застосуванням частотних перетворювачів є найбільш прогресивним, енергоефективним та раціональним методом на сьогоднішній день. Крім того, огляд патентної інформації та технічної літератури, зокрема систем телеметрії STSP і алгоритмів оптимізації енергоспоживання SEC, підтвердив, що сучасні рішення обов'язково базуються на глибокій інтеграції програмованих логічних контролерів, розширених мереж сенсорів та багаторівневих систем диспетчеризації.

Комплексний аудит діючої насосної станції виявив її значну моральну та фізичну застарілість. На даний момент керування тиском здійснюється вкрай неефективним методом ручного дроселювання потоку води за допомогою клиновидних засувок. Наявні контрольно-вимірювальні прилади, зокрема застаріле електромеханічне реле РД-8Т, повністю вичерпали свій ресурс, а облік витрати води не інтегрований у загальну систему автоматики і потребує візуального зняття показників. Окрім цього, зворотні клапани не мають засобів моніторингу їхнього стану, а на самому об'єкті повністю відсутні системи захисту від затоплення машинного залу, пожежної безпеки та охоронної сигналізації.

Зважаючи на виявлені недоліки та спираючись на вимоги підприємства-замовника, було сформовано комплексне завдання на проектування нової системи автоматизації. Воно передбачає повну відмову від ручного дроселювання та впровадження системи автоматизованого керування на базі сучасного програмованого логічного контролера й частотних перетворювачів. Також завдання вимагає кардинального оновлення гідравлічної обв'язки та контрольно-вимірювальних приладів, розробки локального людино-машинного інтерфейсу і забезпечення надійного радіоканалу для телемеханічного зв'язку з центральним диспетчером. Окремим важливим пунктом є обов'язкова інтеграція комплексних підсистем безпеки для раннього виявлення пожежі, підтоплення та несанкціонованого проникнення на об'єкт.

РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВОДОПОСТАЧАННЯ

2.1 Обґрунтування та вибір алгоритму керування насосними агрегатами із застосуванням частотних перетворювачів

Створення ефективної системи автоматичного керування (САК) насосною станцією із застосуванням технологій частотного регулювання передбачає наявність кількох альтернативних варіантів побудови, кожен з яких спирається на специфічні внутрішні алгоритми функціонування. Наочна класифікація можливих варіантів алгоритмічної побудови САК продемонстрована на рисунку 2.1. Для прийняття обґрунтованого рішення та вибору найбільш оптимального методу, що повною мірою відповідатиме суворим критеріям і вимогам Технічного завдання на автоматизацію, необхідно провести глибокий аналіз кожного з існуючих алгоритмів. Цей аналіз та порівняння базуватимуться на чотирьох ключових техніко-економічних критеріях: по-перше, оцінюватиметься точність підтримки заданих параметрів та загальний діапазон регулювання системи; по-друге, розроблятиметься спектр функціональних можливостей та гнучкість налаштувань; по-третє, визначатиметься рівень енергоефективності при різних режимах навантаження; і, по-четверте, враховуватиметься підсумкова вартість впровадження обраного рішення.

Першим з варіантів є алгоритм групового регулювання. Концепція цього підходу полягає у використанні лише одного, але потужного частотного перетворювача (ПЧ), який бере на себе завдання одночасного синхронного управління цілою групою електродвигунів. У сучасній інженерній практиці таке рішення зустрічається досить рідко. Точність підтримки технологічних параметрів та ширина діапазону регулювання при груповому управлінні значною мірою залежать від специфікації обраних апаратних засобів та складності прикладного програмного забезпечення. Серйозним технічним нюансом є те, що така конфігурація безальтернативно вимагає встановлення додаткового спеціалізованого обладнання для надійного індивідуального захисту кожного двигуна та насосного агрегату в цілому. Крім того, групове

регулювання є вкрай негнучким, оскільки воно повністю виключає можливість використання у складі однієї системи насосів з різними гідродинамічними характеристиками. Загальна енергоефективність такої системи суттєво знижується в періоди малого споживання води, оскільки всі підключені насоси змушені працювати синхронно зі зниженою частотою, що призводить до падіння їхнього коефіцієнта корисної дії (ККД). До вагомих економічних недоліків слід також віднести надзвичайно високу вартість частотних перетворювачів великої потужності, необхідних для живлення всієї групи двигунів.

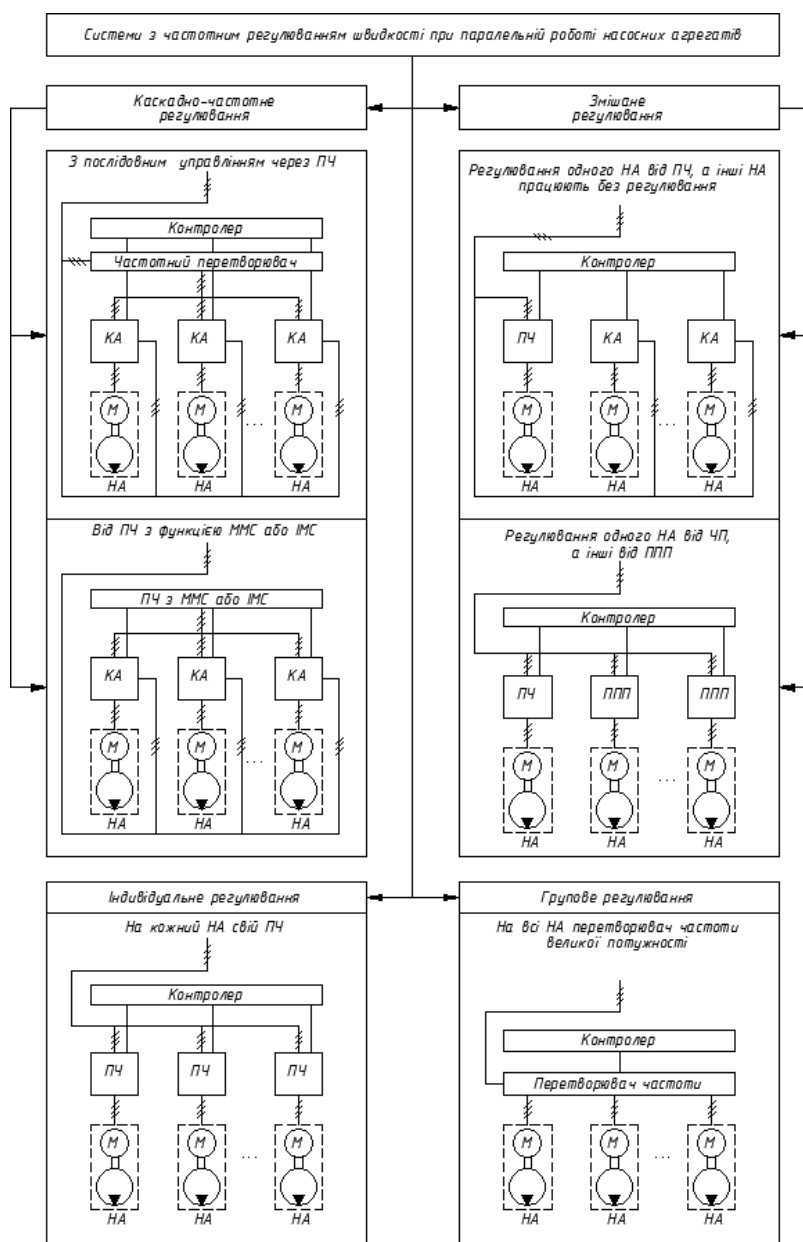


Рисунок 2.1 – Класифікація та архітектурні варіанти побудови САК насосної станції на основі різних алгоритмів регулювання групи паралельно працюючих насосних агрегатів

Наступним варіантом є алгоритм змішаного регулювання. Архітектура цього підходу передбачає наявність одного насосного агрегату, швидкість якого безперервно змінюється за допомогою частотного приводу (регульований агрегат), у той час як інші насоси в системі працюють з постійною (номінальною) частотою обертання або перебувають у вимкненому стані (нерегульовані агрегати). Таке поєднання дозволяє досягти досить високої точності стабілізації параметрів, що забезпечується завдяки плавній роботі перетворювача частоти під керівництвом складного адаптивного алгоритму управління. Однак, змішаний метод має ряд критичних недоліків, головним з яких є неминучі сильні стрибки напруги (просадки) в живильній електромережі. Вони виникають внаслідок жорстких перехідних процесів (пускових струмів) під час прямого пуску додаткових нерегульованих двигунів, що негативно впливає на якість електроенергії та призводить до прискореного зносу всього електромеханічного обладнання. Існує інженерне рішення, здатне пом'якшити ці негативні явища: воно полягає у використанні пристроїв плавного пуску (УПП) у комбінації з ПЧ для каскадного включення насосних агрегатів. Це дозволяє суттєво зменшити струмові кидки в мережі, знизити механічне зношування елементів системи та ефективно запобігати гідравлічним ударами у трубопроводах під час комутацій. З іншого боку, інтеграція додаткових силових модулів УПП неминуче призводить до значного подорожчання всієї системи керування.

Більш складною та досконалою варіацією є каскадно-частотне регулювання. Застосування цього алгоритму стає особливо доцільним та техніко-економічно обґрунтованим для насосних станцій, що налічують велику кількість встановлених насосних агрегатів. Цей метод здатний забезпечити відмінну якість та плавність регулювання, гарантує високі показники енергоефективності роботи станції, а також відзначається великим потенціалом для майбутньої модернізації чи розширення системи. Принцип його дії полягає в наступному: на початковому етапі основний (перший) насосний агрегат, керований частотним перетворювачем, стабілізує заданий технологічний параметр (наприклад, тиск) у межах діапазону навантажень, з яким може впоратися один насос, плавно

розганяючись від мінімальних обертів до номінальної частоти. Якщо споживання води продовжує зростати і продуктивності одного агрегату стає недостатньо, двигун цього першого насоса, який вже досяг номінальної швидкості, беззупинно перемикається (синхронізується) для живлення безпосередньо від промислової мережі (50 Гц). У цей же час вивільнений частотний перетворювач миттєво підключається до управління наступним (додатковим) насосним агрегатом, який тепер бере на себе роль регулюючої ланки. У разі подальшого збільшення витрати води цей процес каскадного підключення нових агрегатів повторюється за аналогічною схемою. При зниженні навантаження в мережі алгоритм ініціює відключення агрегатів у суворо зворотній послідовності.

Окремої уваги заслуговує метод керування, що базується на застосуванні спеціалізованих ПЧ з вбудованою функцією багатомоторного управління (відомих як MMC – Multi Motor Control або IMC – Intelligent Motor Control). Особливість цих інтелектуальних інверторів полягає в тому, що вони здатні повністю замінити зовнішній програмований логічний контролер (ПЛК), оскільки вся необхідна складна логіка каскадного управління вже інтегрована безпосередньо в їхнє мікропрограмне забезпечення. Незважаючи на те, що ПЧ з функцією багатомоторного управління є надзвичайно зручним інструментом для швидкого розгортання автоматизованої системи керування насосною станцією, вони не можуть розглядатися як повноцінна, всеосяжна система управління через наявність суттєвих обмежень. Перший недолік полягає в тому, що при використанні такого алгоритму (MMC) повноцінний електронний захист гарантується виключно для того двигуна, який у даний конкретний момент часу безпосередньо живиться і керується від ПЧ. Функція захисту решти двигунів, які наразі працюють безпосередньо від електромережі, повністю покладається на їхню традиційну пускорегулюючу апаратуру (теплові реле, магнітні пускачі, контактори), що є менш надійним. У разі виникнення збою в роботі будь-якого з додаткових двигунів, спеціалізований ПЧ дізнається про це лише через відповідні діагностичні дискретні входи (якщо вони задіяні), після чого аварійний двигун просто алгоритмічно виключається з циклу подальшої роботи.

Другий критичний недолік — це проблема єдиної точки відмови: будь-який вихід з ладу самого інтелектуального ПЧ призводить до повної зупинки системи і неможливості продовження роботи в автоматичному режимі. Натомість спеціалізована станція управління, побудована на базі незалежного ПЛК, здатна продовжувати функціонування (наприклад, у релейному або ручному режимі) навіть у випадку поломки перетворювача частоти. Крім того, спеціалізована станція на базі ПЛК здатна реалізовувати значно ширший спектр захисних та сервісних функцій, які фізично недоступні автономному ПЧ, зокрема, забезпечення автоматичного введення резервного живлення (ABR) при зникненні основної напруги, організацію складної системи телеметрії, диспетчеризації тощо.

Найбільш досконалим вважається алгоритм індивідуального регулювання. Суть цього підходу полягає в тому, що кожен без винятку двигун у насосній станції жорстко підключений до власного, індивідуального перетворювача частоти. Даний підхід визнаний найбільш універсальним та гнучким, оскільки він забезпечує максимально можливу точність підтримки параметрів у надзвичайно широкому діапазоні регулювання продуктивності. Функціональні можливості такої конфігурації практично не обмежені нічим, окрім фізичних енергетичних характеристик самих агрегатів. Індивідуальне керування гарантує 100% реалізацію всього спектру захисних функцій для кожного насоса незалежно один від одного (що включає миттєвий захист від перевантаження за струмом та часом, захист від втрати навантаження або «сухого ходу», захист від міжфазного короткого замикання, моніторинг відхилення напруги мережі живлення, виявлення обриву фаз, контроль правильності послідовності фаз та багато інших параметрів). Важливою перевагою є можливість безперешкодного використання в одній системі насосів з абсолютно різними гідравлічними характеристиками, оскільки кожен інвертор налаштовується індивідуально. Максимальна енергоефективність цієї системи досягається завдяки тому, що на основі глибоких енергетичних розрахунків система безперервно оптимізує та синхронізує параметри роботи всіх активних насосів для досягнення найменшого сумарного енергоспоживання. Хоча оснащення кожного насосного

агрегату (НА) окремим ПЧ прогнозовано збільшує початкову капітальну вартість САК, практика доводить, що за умови невеликої кількості НА в системі, вкладені інвестиції окупаються відносно швидко за рахунок максимальної економії електроенергії.

З огляду на те, що проектувана насосна станція для перекачування води має у своєму складі всього лише два насосні агрегати, а також спираючись на всі перелічені беззаперечні переваги індивідуального алгоритму регулювання і жорсткі вимоги затвердженого Технічного завдання, для розробки САК цією насосною станцією було прийнято обґрунтоване рішення застосувати саме індивідуальний алгоритм регулювання (один ПЧ на один двигун). Водночас, зважаючи на стратегічну необхідність забезпечення високої відмовостійкості та можливості роботи САК не лише в автоматизованому, а й у ручному (аварійному) режимі, конструкція системи передбачатиме спеціальні ланцюги управління. Саме для ручного режиму (який активується, зокрема, у випадку критичного виходу з ладу ПЧ відповідного НА) буде закладена апаратна можливість роботи насосного агрегату через традиційну комутаційну апаратуру (КА), що дозволить запускати двигун на його номінальній (прямій) швидкості обертання безпосередньо від живильної мережі електропостачання в обхід електроніки інвертора.

2.2 Розробка принципової гідравлічної схеми насосної станції відповідно до вимог Технічного завдання на автоматизацію

Зважаючи на суворі вимоги, що були висунуті у затвердженому Технічному завданні на комплексну автоматизацію, виникла гостра необхідність у проведенні глибокої модернізації існуючої гідравлічної системи насосної станції. Насамперед архітектура трубопровідної об'язки потребує дооснащення критично важливим додатковим обладнанням. Зокрема, йдеться про обов'язкове встановлення ще одного клапана зворотного ходу води безпосередньо на вихідному патрубку насосного агрегату, оскільки під час попереднього аудиту було виявлено його відсутність на одній з робочих ліній.

При цьому ключовою умовою є застосування не звичайних, а спеціалізованих клапанів зворотного ходу. Їхня механічна конструкція повинна бути адаптована для безперешкодної інтеграції відповідних засобів промислової автоматики, які дозволять системі керування безперервно визначати поточний фізичний стан арматури. У якості таких засобів можуть виступати зовнішні індуктивні датчики положення, або ж доцільно використати більш технологічні моделі клапанів, які вже мають інтегрований заводський електронний блок для постійного контролю позиції їхніх внутрішніх заслінок.

Наступним важливим кроком модернізації є кардинальне оновлення парку контрольно-вимірювальних приладів. Проектні вимоги передбачають проведення повного демонтажу старого електромеханічного реле тиску, яке було встановлене на вхідному (всмоктувальному) колекторі насосних агрегатів і на даний момент є як фізично зношеним, так і морально застарілим. Замість цього застарілого вузла необхідно змонтувати сучасний високоточний аналоговий перетворювач (давач) тиску, що забезпечить надійний захист обладнання від роботи в режимі «сухого ходу» та дозволить здійснювати безперервний моніторинг.

Окрім вхідної магістралі, суттєвій модернізації підлягає і напірний вузол насосної станції. Для забезпечення максимально точного контролю навантаження та отримання достовірної інформації про роботу кожного окремого насосного агрегату, вимагається обов'язково оснастити їхні вихідні лінії індивідуальними давачами тиску. Водночас, для повноцінної реалізації функції дистанційного та повністю автоматизованого моніторингу поточного об'єму витрати води (фактичної подачі станції) у режимі реального часу, необхідно інтегрувати в систему витратомір. Цей прилад має бути обов'язково оснащений імпульсним вихідним сигналом для безпроблемної та швидкої передачі вимірянних даних безпосередньо на програмований логічний контролер.

Взявши до уваги всі вищезазначені інженерні рішення та виконавши вимоги щодо нових місць встановлення сучасного контрольно-вимірювального обладнання, було спроектовано та розроблено оновлену модернізовану принципову гідравлічну схему насосної станції. Візуальне представлення цієї

схеми для загального ознайомлення наведено нижче на рисунку 2.2.

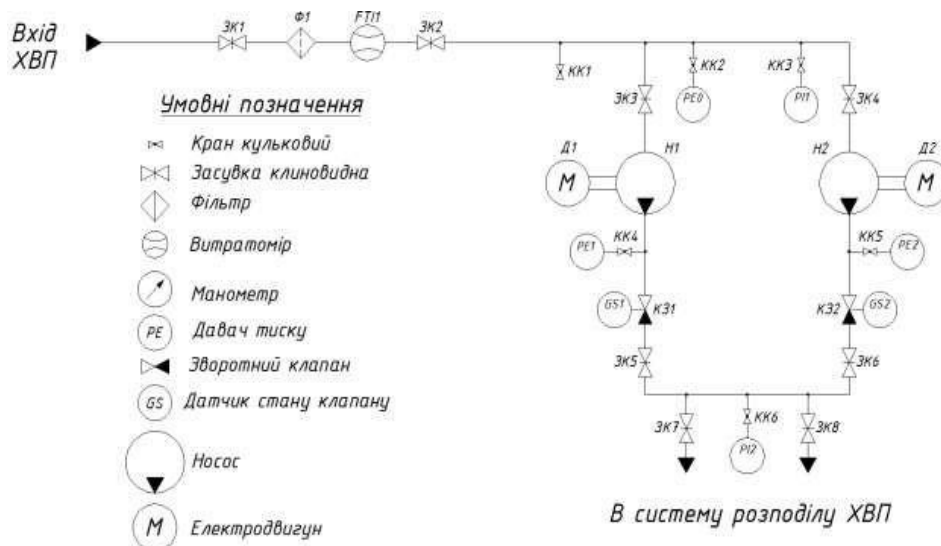


Рисунок 2.2 – Модернізована принципова гідравлічна схема насосної станції водопостачання

2.3 Структурна організація системи автоматизованого керування насосною станцією водопостачання

Спираючись на попередньо обраний алгоритм індивідуального регулювання, який передбачає плавну та незалежну зміну швидкості обертання робочих коліс кожного окремого насосного агрегату за допомогою виділених перетворювачів частоти в штатному автоматичному режимі експлуатації станції, було розроблено загальну концепцію системи автоматичного керування (САК). Водночас, з метою беззаперечного підвищення надійності та забезпечення безперебійності водопостачання, інженерним задумом передбачено повноцінну апаратну реалізацію резервного ручного режиму. Цей режим базується на можливості прямого підключення агрегатів до мережі електроживлення через відповідну силову комутаційну апаратуру, що дозволить насосам безперешкодно функціонувати на їхній номінальній частоті напруги навіть у разі виникнення позаштатних ситуацій або виходу з ладу електронних компонентів. Результатом поєднання цих підходів стала комплексна узагальнена структура САК, графічне відображення якої представлено на рисунку 2.3.

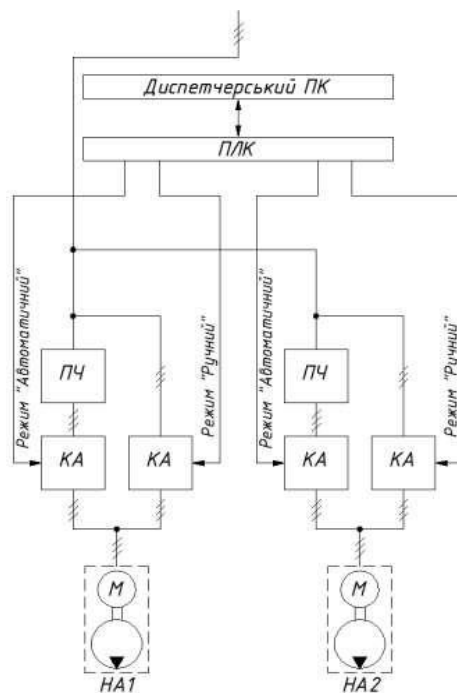


Рисунок 2.3 – Концептуальна структурна модель системи автоматичного керування насосною станцією на основі індивідуального частотного регулювання

Формування архітектури системи здійснювалося у суворій відповідності до затверджених вимог Технічного завдання на автоматизацію. Застосовуючи комплексний та системний підхід, спрямований на гарантування максимально стійкої, довговічної та абсолютно безпечної експлуатації всього технологічного обладнання станції, було суттєво розширено класичний функціонал автоматики. Відтепер на систему автоматизованого керування покладаються не лише стандартні завдання щодо точного регулювання гідравлічної продуктивності станції та безперервного контролю робочих параметрів електромеханічного устаткування. Критично важливою складовою нової САК став постійний моніторинг поточної навколишньої обстановки безпосередньо у виробничих приміщеннях об'єкта. Зокрема, система в режимі реального часу відстежує ймовірну появу задимлення повітря (пожежна небезпека), фіксує найменші ознаки підтоплення машинного залу (аварійні витоки води) та негайно реагує на будь-які спроби несанкціонованого проникнення чи порушення охоронного периметру будівлі. Впровадження таких глибоких інструментів контролю є життєво необхідним, оскільки зовнішні фактори та надзвичайні ситуації мають прямий і безпосередній вплив на загальну працездатність, експлуатаційну

довговічність та рівень безпеки всієї насосної станції в цілому.

Для забезпечення повноцінної інтеграції станції в загальноміську мережу диспетчеризації передбачено організацію надійного бездротового зв'язку. Передача тривожних сповіщень та сигналів автоматичної пожежної сигналізації (АПС), а також безперебійний прийом віддалених керуючих команд від персонального комп'ютера центрального міського диспетчера здійснюється за допомогою захищеного радіоканалу. Локальне управління всім технологічним процесом знаходиться під повним контролем програмованого логічного контролера (ПЛК). Саме цей потужний мікропроцесорний пристрій відповідає за безпосереднє генерування команд для виконавчих механізмів, постійний моніторинг фактичних значень технологічних параметрів з усіх наявних датчиків та плавний алгоритмічний перехід обладнання у відповідні експлуатаційні режими. З метою створення зручного та інтуїтивно зрозумілого інформаційного середовища для взаємодії місцевого оператора з комплексом САК, до складу апаратного забезпечення інтегровано сучасну сенсорну панель людино-машинного інтерфейсу (HMI). Деталізовану взаємодію всіх перелічених компонентів, модулів та рівнів управління наочно демонструє розгорнута структурна схема, яка наведена на рисунку 2.4.

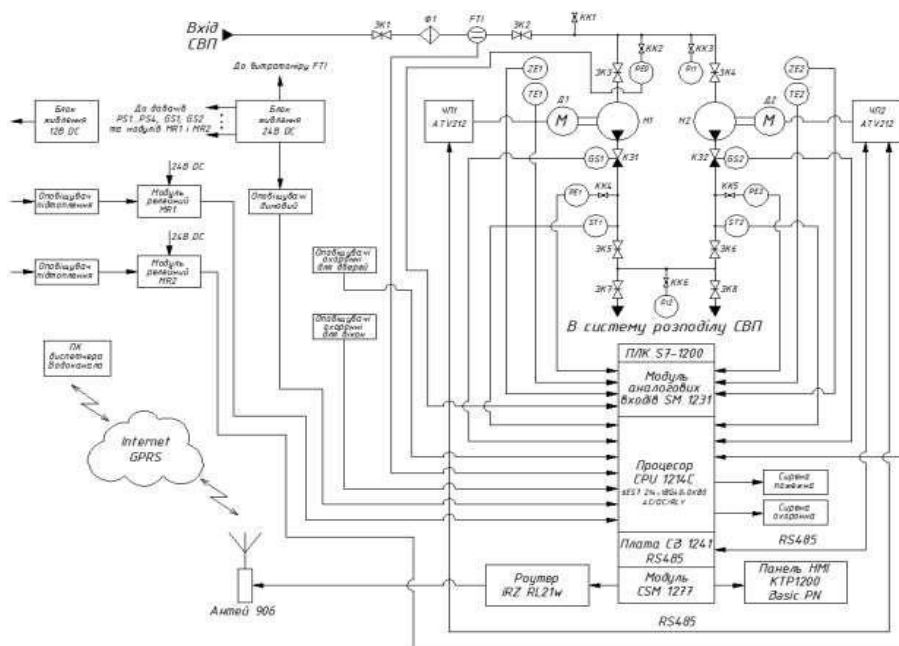


Рисунок 2.4 – Розгорнута структурна схема апаратно-програмного комплексу САК насосної станції

2.4 Підбір та характеристика засобів автоматизації для побудови САК

Для практичної апаратної реалізації розробленої системи автоматичного керування насосною станцією було здійснено ретельний і обґрунтований підбір сучасної елементної бази. Вибір кожного окремого компонента базувався на розробленій раніше розгорнутій структурній схемі, яка була детально наведена на рисунку 2.4.

Вибір головного силового елемента — перетворювача частоти — здійснювався виходячи з номінальної потужності електродвигунів насосних агрегатів, яка у нашому випадку становить 1,5 кВт. Головною інженерною умовою є те, що потужність частотного перетворювача обов'язково повинна бути не меншою, а в ідеалі мати певний експлуатаційний запас відносно потужності самого насосного агрегату для забезпечення надійного пуску та тривалої роботи без теплових перевантажень. Для ефективного керування швидкістю обертання робочих коліс кожного агрегату був обраний надійний частотний перетворювач серії Altivar 212 моделі ATV212 потужністю 2,2 кВт, розрахований на трифазну напругу 380-480В. Цей пристрій виробництва відомої компанії «Schneider Electric» має базовий ступінь захисту IP21 та додатково оснащений вбудованим ЕМС-фільтром категорії C₂/C₃ для мінімізації електромагнітних завад у промисловій мережі. Його зовнішній вигляд представлено на рисунку 2.5. Основними технічними параметрами обраного пристрою є його призначення для плавного регулювання асинхронних двигунів при живленні від трифазної мережі з напругою від 323 до 528 В та частотою 50..60 Гц із допустимим відхиленням $\pm 5\%$. При цьому лінійний струм споживання становить 4,6 А при напрузі 380 В і 3,6 А при 480 В. Перетворювач оптимізований для цільового застосування з насосами та вентиляторами і підтримує широкі комунікаційні можливості, зокрема протоколи Modbus, BACnet, LonWorks, METASYS N2 та APOGEE FLN.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд перетворювача частоти Schneider Electric Altivar 212 потужністю 2,2 кВт

Як інтелектуальне ядро системи автоматики, що безпосередньо відповідає за безперебійне виконання алгоритмів управління, було обрано високотехнологічне обладнання від компанії «Siemens», яке належить до добре зарекомендованого сімейства SIMATIC S7-1200. Серцевиною цього апаратного комплексу є центральний мікропроцесор моделі 1214C AC/DC/Reley (артикул виробника 6ES7 212-1BE40-0XB0). Цей потужний модуль здатен повною мірою вирішувати всі завдання, чітко поставлені в Завданні на проектування. Зовнішній вигляд процесора показано на рисунку 2.6. Технічні можливості даного контролера включають наявність 14 дискретних входів, серед яких є швидкісні імпульсні, 10 дискретних виходів, чотири з яких можуть працювати в імпульсному режимі, а також двох вбудованих аналогових входів. Контролер підтримує широкі можливості розширення: до нього можна підключити одну комунікаційну плату безпосередньо в корпус, до трьох комунікаційних модулів та до восьми сигнальних модулів. Програмування логіки здійснюється у сучасному середовищі розробки TIA Portal. Крім того, пристрій оснащений апаратним годинником реального часу, його внутрішня шина з напругою 5В здатна витримувати струм навантаження до 1600 мА, а вбудоване джерело живлення для датчиків видає струм до 400 мА.



Рисунок 2.6 – Центральний процесорний пристрій Siemens SIMATIC S7-1200 моделі 1214C

Для забезпечення збору точних даних з численних аналогових датчиків, якими насичена система керування, до центрального процесора додано спеціалізований модуль аналогових входів SM 1231 AI 8x13bit з артикулом 6ES7231-4HF32-0XB0. Його вигляд наведено на рисунку 2.7. Цей модуль живиться від постійної напруги 24В і споживає 45 мА струму. Він надає вісім диференціальних аналогових входів, що здатні приймати як сигнали напруги ($\pm 10\text{В}$, $\pm 5\text{В}$, $\pm 2,5\text{В}$), так і струмові сигнали ($0 \dots 20\text{мА}$, $4 \dots 20\text{мА}$). Висока точність вимірювань забезпечується 12-бітним аналого-цифровим перетворювачем зі знаковим розрядом, при цьому допустима довжина екранованого сигнального кабелю типу «вита пара» може сягати 100 метрів за умови захисту IP 20.



Рисунок 2.7 – Модуль розширення для підключення аналогових сигналів SM 1231 AI 8x13bit

Для організації надійної промислової мережі та об'єднання інтелектуальних пристроїв, таких як ПЛК, роутер та HMI-панель, по швидкісній шині Industrial Ethernet застосовано спеціалізований комунікаційний модуль CSM 1277 з артикулом 6GK7 277-1AA10-0AA0. Він фактично виконує роль компактного

некерованого комутатора, зовнішній вигляд якого зображено на рисунку 2.8. Модуль живиться від 24В постійного струму і має чотири канали з роз'ємами RJ45 для підключення до мережі Industrial Ethernet, забезпечуючи автоматичне визначення швидкості обміну даними на рівні 10 або 100 Мбіт/сек. З метою організації безперебійного зв'язку центрального процесора з частотними перетворювачами по захищеному промисловому інтерфейсу RS485 в апаратну конфігурацію включена комутаційна плата CB 1241 RS485 з артикулом 6ES7241-1CH30-1XB0. Вона зручно встановлюється безпосередньо на передній панелі корпусу процесора. Вигляд цієї плати наведено на рисунку 2.9. Плата забезпечує двопровідний напівдуплексний зв'язок за протоколом Modbus RTU, живиться від внутрішньої шини контролера напругою 5В та споживає вхідний струм близько 50 мА.



Рисунок 2.8 – Промисловий некерований комутатор CSM 1277

Для організації зручного локального диспетчерського пункту та забезпечення інтуїтивно зрозумілої взаємодії чергового оператора з системою обрано сучасний широкоформатний TFT дисплей моделі KTP1200 Basic PN з артикулом 6AV2123-2MB03-0AX0. Його детальний вигляд показано на рисунку 2.10.



Рисунок 2.9 – Широкоформатний TFT дисплей моделі KTP1200 Basic PN

Ця сенсорна панель оператора має діагональ екрану 12 дюймів з аналоговою матрицею і додатково оснащена десятима програмованими мембранними кнопками для дублювання важливих команд. Панель живиться напругою 24В при максимальному струмі споживання 650 мА. Вона має 10 Мбайт користувацької пам'яті, вбудований годинник реального часу і підтримує інтеграцію через інтерфейси PROFINET, MPI/PROFIBUS DP та USB Host. Програмування інтерфейсу здійснюється в єдиному середовищі TIA Portal.



Рисунок 2.10 – Широкоформатна сенсорна панель оператора KTP1200 Basic PN

Для гарантування надійного бездротового обміну технологічними даними між локальним контролером насосної станції та комп'ютером головного диспетчера міського «Водоканалу» через глобальні мережі стільникового зв'язку було обрано промисловий LTE роутер iRZ RL21w. Його зовнішній вигляд представлено на рисунку 2.11. Роутер підтримує всі сучасні стандарти зв'язку, включаючи GPRS/EDGE, UMTS, HSDPA/HSUPA, HSPA+ та швидкісний LTE. Він має 64 Мбайт динамічного ОЗП, два порти Ethernet 10/100 Мбіт, вбудований

модуль Wi-Fi на 2,4 ГГц стандарту 802.11b/g/n та живиться від джерела постійного струму напругою від 8 до 30 В при ступені захисту IP 20. З метою забезпечення стабільного з'єднання навіть у географічних зонах зі слабким покриттям стільникової мережі, роутер обов'язково комплектується потужною виносною антеною Антей 906 SMA GSM 900/1800, яка зображена на рисунку 2.12. Вона працює в широкому діапазоні частот 900...1800 МГц, має коефіцієнт підсилення від 11 до 13,5 дБ, максимальну вхідну потужність 20 Вт та хвильовий опір 50 Ом. Антена комплектується триметровим кабелем і зручною магнітною базою діаметром 75 мм для швидкого монтажу на металеві поверхні.



Рисунок 2.11 – Стільниковий LTE-маршрутизатор промислового виконання iRZ RL21w



Рисунок 2.12 – Зовнішня підсилювальна антена стільникового зв'язку Антей 906 SMA

Для безперервного та точного вимірювання тиску рідини як у всмоктувальному, так і в напірному колекторах насосних агрегатів обрано надійні промислові перетворювачі тиску Danfoss MBS 3000 2011-1A04, показані на рисунку 2.13. Вони призначені для роботи з різними рідинами та газами,

здатні вимірювати як абсолютний, так і відносний тиск у діапазоні від 0 до 10 бар. Пристрої живляться від напруги 9...32В і формують універсальний вихідний струмовий сигнал 4...20 мА. Завдяки високому ступеню захисту IP 65 та технологічному різьбовому з'єднанню G1/4A, вони є оптимальним вибором для жорстких умов експлуатації, при цьому допустима довжина кабелю підключення може сягати 500 метрів. Для безпомилкового визначення відкритого або закритого стану інноваційного клапана зворотного потоку води, застосовано безконтактний індуктивний давач XS618B1PAL2, зображений на рисунку 2.14. Цей сенсор наближення має номінальну дистанцію спрацьовування 8 мм і електричне виконання DC PNP з дискретним нормально відкритим (НО) виходом. Він розрахований на напругу живлення від 12 до 48В, монтується за допомогою метричної різьби M18x1 і відрізняється найвищим ступенем герметичності IP 68. Суворий облік поточної витрати води здійснюється за допомогою промислового імпульсного витратоміра Arator MWN-65-NK, зовнішній вигляд якого наведено на рисунку 2.15. Пристрій має номінальний діаметр 65 мм, середній об'єм потоку 1,6 м³/год (поріг запуску 0,3 м³/год) та оснащений передавачем імпульсів типу NK, який генерує рівно один імпульс на кожен кубічний дециметр води, гарантуючи похибку вимірювань у межах $\pm 2\%$.



Рисунок 2.13 – Промисловий перетворювач тиску серії Danfoss MBS 3000



Рисунок 2.14 – Індуктивний сенсор положення механізмів XS618B1PAL2



Рисунок 2.15 – Імпульсний лічильник (витратомір) води Apator MWN-65-NK

Моніторинг механічного стану дороговартісного обладнання та фіксація гранично допустимих значень вібрації здійснюється давачами вібрації ST5484E-122-BBCD-EF, показаними на рисунку 2.16. Їх впровадження дозволяє автоматично своєчасно реагувати на критичний знос підшипників чи дисбаланс, вимірюючи вібрацію зі швидкістю до 12,7 мм/сек із передачею стандартизованого сигналу 4...20 мА при живленні 11...30В DC. Тепловий стан корпусів електродвигунів контролюється за допомогою спеціальних давачів температури серії Milli-Temp 4-20мА від компанії «4В», зображених на рисунку 2.17. Вони надійно працюють у розширеному діапазоні температур від -40°C до +120°C (захист IP 66, напруга 15...28В DC), перетворюючи виміряне значення у стандартний струмовий сигнал. Факт реального руху рідини в трубопроводі надійно підтверджується електронним давачем потоку SI5002 SID10ADBFPKGUS-100 від компанії ifm, який показано на рисунку 2.18. Цей

прилад здатен вимірювати швидкість потоку від 3 до 300 см/сек і має нормально відкритий вихідний контакт при відсутності потоку (виконання DC PNP), забезпечуючи надійний захист від роботи агрегатів «на засувку».



Рисунок 2.16 – Вібраційний перетворювач промислового класу ST5484E



Рисунок 2.17 – Температурний сенсор корпусу двигуна Milli-Temp



Рисунок 2.18 – Електронне реле контролю потоку рідини ifm SI5002

Система комплексної безпеки станції базується на кількох типах спеціалізованих сповіщувачів. Для своєчасного виявлення пожежної небезпеки застосовано комбіновані давачі диму та температури ИП 212/101-2М-А1R, які зображені на рисунку 2.19. Вони функціонують при навколишніх температурах від -30°C до $+70^{\circ}\text{C}$ (живлення 8...30В DC) і в черговому режимі мають нормально замкнений (NC) вихідний сигнал. Аварійні протікання води в машинному залі миттєво фіксуються давачами підтоплення Ostopus, які показані на рисунку 2.20. Вони встановлюються безпосередньо на підлозі біля постаментів агрегатів і підключаються через відповідні релейні модулі Com-01 Mini, споживаючи в сухому стані струм не більше 5 мкА при опорі контактів 330

МОм (сигнал без підтоплення — NO). Охоронний периметр будівлі надійно захищений магнітоконттактними давачами СМК-1Е, зовнішній вигляд яких наведено на рисунку 2.21. Ці пасивні пристрої монтуються на входних дверях, формуючи сигнал тривоги при розмиканні контактів на відстань понад 25 мм відносно чергового режиму (10 мм), де сигнал є нормально замкненим (NC). Віконні отвори додатково захищаються давачами типу «фольга», що реагують на розбиття скла шляхом розриву струмопровідного контуру, який постійно контролюється входом ПЛК. Локальне сповіщення персоналу про пожежу чи незаконне проникнення здійснюється за допомогою потужних пристроїв: пожежного світлозвукового оповісчувача ОСЗ-2 «Пожежа» з акустичною потужністю 75 Дб (струм споживання 35 мА при 12В), показаного на рисунку 2.22, та антивандального охоронного оповісчувача TIRAS "Джміль" гучністю 80 Дб (струм 70 мА при 24В), який зображено на рисунку 2.23.



Рисунок 2.19 – Комбінований пожежний детектор ІП 212/101-2М-А1R



Рисунок 2.20 – Сенсор виявлення затоплення приміщення Ostorus



Рисунок 2.21 – Охоронний магнітоконтантний сповіщувач СМК-1Е



Рисунок 2.22 – Світлозвуковий сигнальний пристрій ОСЗ-2 «Пожежа»



Рисунок 2.23 – Вулична охоронна сирена TIRAS "Джміль"

Безперебійне живлення всієї низьковольтної електроніки шафи керування забезпечується якісними імпульсними джерелами живлення від бренду Mean Well. Для обладнання на 12В застосовано компактний блок HDR-15-12 потужністю 15 Вт (вихідний струм 1,25А), зовнішній вигляд якого показано на рисунку 2.24. Для споживачів на 24В інтегровано блок HDR-30-24 потужністю 36 Вт (вихідний струм 1,5А), зображений на рисунку 2.25. Обидва блоки підтримують вхідну напругу в межах 85...264В AC. Якість вхідної трифазної напруги (280...520В AC) безперервно аналізується багатофункціональним реле контролю фаз RKF-37 EKF PROxima, яке наведено на рисунку 2.26. Воно захищає двигуни, миттєво (за 0,5с) відключаючи живлення при перекосі, обриві, порушенні чергування фаз або відхиленні напруги від норми. Гальванічна розв'язка та проміжна комутація сигналів у ланцюгах управління здійснюється реле F&F PK-4PZ-24V (24В AC/DC, 8А струму комутації), показаним на рисунку

2.31. У ручному режимі силовим керуванням та захистом насосних агрегатів займаються надійні електромагнітні контактори TeSys D LC1D25BD від компанії Schneider Electric, які зображені на рисунку 2.27. Вони розраховані на струм 25А (категорії AC1, AC-2, AC-3) і оснащені механічним взаємним блокуванням. Захист самих електродвигунів від струмів короткого замикання та перевантажень гарантують триполюсні мотор-автомати серії GZ1E14 від Schneider Electric (розчіплювач 6..10А, відключаюча здатність до 100кА), вигляд яких показано на рисунку 2.28. Вхідні кола перетворювачів частоти надійно захищені модульними автоматами iC60H 3P 25А з кривою відключення типу «С» (до 10кА), як показано на рисунку 2.29, а слабоструміві кола управління оберігають однополюсні автоматичні вимикачі RESI9 6А 1Р, які можна побачити на рисунку 2.30.



Рисунок 2.24 – Імпульсний блок живлення Mean Well HDR-15-12



Рисунок 2.25 – Імпульсний блок живлення Mean Well HDR-30-24



Рисунок 2.26 – Реле контролю напруги та фаз RKF-37 EKF PROxima



Рисунок 2.27 – Силовий електромагнітний контактор Schneider Electric TeSys D



Рисунок 2.28 – Автоматичний вимикач захисту двигуна Schneider Electric GZ1E14



Рисунок 2.29 – Триполюсний автоматичний вимикач Schneider Electric iC60H



Рисунок 2.30 – Однополюсний модульний вимикач Schneider Electric RESI9

На передній панелі шафи керування розташовані органи управління ручним режимом роботи. Подача команд пуску виконується за допомогою зелених кнопок з підсвічуванням LAY5-BW3361 (контакт 1NO), а команд зупинки — червоних кнопок LAY5-BW3461 (контакт 1NC) виробництва компанії IEK. Їх зовнішній вигляд наведено відповідно на рисунках 2.31а та 2.31б. Світлова індикація поточних режимів роботи та стану обладнання забезпечується надійними світлодіодними лампами серії AD-22DS. Залежно від конкретного призначення у схемі, застосовуються червоні лампи змінного струму на 220В, а також зелені лампи у виконаннях на 24В постійного та 220В змінного струму, які зображено на рисунках 2.32а, 2.32б та 2.32в.



а



б

Рисунок 2.31а/б – Кнопка включення LAY5-BW3361 (а) та кнопка відключення LAY5-BW3461 (б)



а



б



в

Рисунок 2.32 – Світлова арматура індикації: червоний індикатор 220В (а), зелений індикатор 220В (б) та зелений індикатор 24В (в)

Особливо важливим етапом стала розробка інноваційного клапана зворотного ходу з можливістю електронного контролю стану. Зворотний клапан є критично важливим елементом захисної трубопровідної арматури, основне призначення якого полягає в автоматичному запобіганні небажаних зміні напрямку руху води та нівелюванні руйнівного впливу стрибків тиску (гідроударів). Встановлений поруч із чутливим насосним обладнанням, такий клапан не лише фізично блокує зворотне перетікання рідини після зупинки агрегату, але й сприяє загальній стабілізації тиску в системі. Незважаючи на широке поширення клапанів підйомного, кулькового та дводискового типів, існує об'єктивна необхідність у вдосконаленні їхньої механічної конструкції задля підвищення технологічності виробництва, надійності під час експлуатації, зручності монтажу, а головне — забезпечення можливості прямої інтеграції в автоматизовані системи управління. Саме тому, використовуючи сучасне середовище автоматизованого проектування Onshape, була розроблена власна, покращена конструкція зворотного клапана, що ідеально відповідає потребам насосної станції. 3D-моделі розробленого пристрою в розрізі для відкритого та закритого положень наочно показані на рисунках 2.33 та 2.34 відповідно.

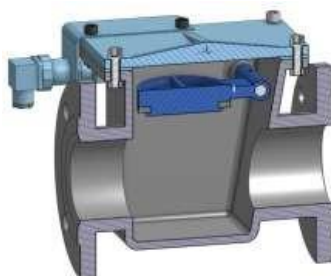


Рисунок 2.33 – 3D-модель розрізу модифікованого зворотного клапана (робоче відкрите положення)

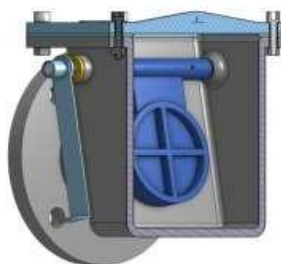


Рисунок 2.34 – 3D-модель розрізу модифікованого зворотного клапана (захисне закрите положення)

Запропонована конструктивна модель клапана має низку беззаперечних переваг перед існуючими аналогами. По-перше, корпус розробленого клапана

отримав значно простішу геометричну форму, що радикально полегшує процеси його виготовлення та механічної обробки, знижуючи загальну собівартість. По-друге, конструкція від самого початку передбачає спеціальний посадковий вузол для встановлення інтегрованого індуктивного датчика, який постійно взаємодіє з внутрішнім важелем і дозволяє контролеру в реальному часі відстежувати фактичне положення заслінки. Крім того, унікальна конструкція поворотної осі дозволяє, за необхідності, монтувати на її вільному кінці (що не зайнятий важелем датчика) додатковий зовнішній важіль зі спеціальним обтяжувачем. Ця корисна опція значно прискорює та підсилює процес закриття заслінки, що є життєво необхідним при роботі в системах водовідведення або при перекачуванні забруднених рідин з підвищеною щільністю.

Висновки до розділу №2

У другому розділі кваліфікаційної роботи було успішно вирішено комплекс інженерно-технічних завдань щодо розробки алгоритмічного, структурного та апаратного забезпечення системи автоматичного керування насосною станцією водопостачання. На основі проведеного глибокого проектування та аналізу сформовано низку важливих висновків.

Насамперед було проведено порівняльний аналіз існуючих методів керування групою насосних агрегатів. За критеріями точності, функціональності, енергоефективності та надійності було обґрунтовано вибір алгоритму індивідуального частотного регулювання, який передбачає використання окремого перетворювача частоти для кожного двигуна. Для додаткового підвищення безвідмовності системи передбачено апаратну реалізацію резервного ручного режиму з можливістю прямого пуску агрегатів безпосередньо від електромережі.

Наступним кроком стала модернізація гідравлічної схеми станції. До оновленої принципової схеми було інтегровано сучасні засоби вимірювальної техніки, зокрема давачі тиску на входному та вихідному колекторах, а також імпульсний витратомір. Крім того, схему доповнено додатковим клапаном зворотного ходу, що в комплексі дозволяє повністю автоматизувати контроль за

гідравлічними режимами та надійно захистити насоси від гідроударів і роботи в аварійному режимі «сухого ходу».

Паралельно було сформовано багаторівневу структурну схему комплексу САК. Окрім безпосереднього керування технологічним процесом безперебійного водопостачання, нова система здійснює постійний моніторинг безпеки всього об'єкта: відстежує можливе задимлення, підтоплення машинного залу та будь-які порушення охоронного периметра. Завдяки застосуванню промислового LTE-роутера успішно реалізовано можливість надійного віддаленого моніторингу та повноцінної диспетчеризації по захищеному радіоканалу.

Для практичної реалізації розроблених рішень здійснено ретельний підбір комплексу технічних засобів (КТЗ), що базується на сучасній елементній базі, яка відповідає жорстким вимогам промислової експлуатації. Інтелектуальним ядром системи став програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 у поєднанні з сенсорною панеллю оператора KTP1200 Basic PN. Силове керування реалізовано на базі перетворювачів частоти Schneider Electric Altivar 212 та надійної комутаційно-захисної апаратури, що доповнюється повним спектром промислових датчиків для контролю тиску, витрати, вібрації, температури та потоку рідини.

Вагомим інноваційним результатом розділу є спроектована за допомогою САПР вдосконалена 3D-модель клапана зворотного ходу. Запропонована механічна конструкція вирізняється вищою технологічністю виготовлення та наявністю інтегрованого індуктивного датчика положення, що дозволяє контролеру в режимі реального часу відстежувати стан внутрішньої заслінки. Також передбачено можливість встановлення зовнішнього обтяжувача для ефективної роботи із забрудненими чи в'язкими рідинами.

Підсумовуючи, розроблений апаратно-технічний комплекс утворює надійну, безпечну та високоенергоефективну базу для реалізації поставлених завдань з автоматизації. Усі запропоновані структурні рішення та обрана елементна база повністю задовольняють вимоги Технічного завдання, що дозволяє аргументовано перейти до наступного етапу роботи — розробки прикладного програмного забезпечення для ПЛК та панелі оператора.

РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Огляд патентної інформації та технічної літератури

3.1.1 Телеметрична система керування проміжними насосними станціями STSP

Телеметрична система керування проміжними насосними станціями, відома під аббревіатурою STSP, розроблена спеціально для здійснення комплексного віддаленого моніторингу та оперативного управління роботою проміжних насосних установок. Ці об'єкти відіграють критичну роль у транспортуванні та розподілі гарячої води, яка виступає в якості теплоносія в розгалуженій мережі централізованого опалення міста. Керування здійснюється централізовано з єдиного диспетчерського пульта.

Специфіка розташування проміжних насосних станцій полягає в тому, що вони географічно віддалені від головного диспетчерського центру на відстань від 4 до 6 кілометрів. Їхнє ключове технологічне призначення зводиться до стабілізації та підтримання оптимального гідравлічного тиску в стратегічно важливих, заздалегідь визначених вузлових точках міської теплової мережі. Виконання цього надважливого завдання реалізується шляхом застосування алгоритмів адаптивного керування загальною продуктивністю станції, що досягається за рахунок інтелектуального вибору оптимальної кількості насосних агрегатів, які повинні працювати в конкретний момент часу.

До базового набору функціональних можливостей системи STSP належать:

1. Процедура автоматизованого запуску насосної станції з нульового стану.
2. Забезпечення автоматичної планової (штатної) зупинки та екстреного (аварійного) відключення обладнання станції.
3. Безперервне автоматичне підтримання заданих параметрів тиску шляхом динамічної зміни кількості працюючих агрегатів та регулювання їхньої продуктивності.
4. Програмований перехід або автоматичне перемикання на резервну лінію електроживлення у разі зникнення напруги на основному вводі.
5. Комплексний захист приміщень станції від несанкціонованого

проникнення (злолому) та інтегрована система пожежної сигналізації.

6. Постійний контроль рівня води у машинному залі для своєчасного виявлення та запобігання підтопленню приміщень.

7. Автоматичне керування запірною арматурою з метою захисту головної магістралі від гідроударів або спустошення у випадку непередбаченого відключення насосної станції.

8. Миттєве апаратне відключення насосних агрегатів при фіксації критичного рівня вібрації або небезпечного перегріву підшипникових вузлів.

9. Організація резервного дублюючого радіоканалу для гарантованого зв'язку з центральним диспетчерським пультом.

10. Надання можливості альтернативного віддаленого керування об'єктом в обхід основних каналів.

11. Збір, обробка та передача даних для локального та дистанційного моніторингу стану гідравлічних і електричних систем станції.

12. Безперервна реєстрація (архівування) всіх критично важливих подій (логів) та динаміки змін ключових технологічних параметрів.

Враховуючи виняткове стратегічне значення цих насосних станцій для забезпечення життєдіяльності всього міського теплового господарства, до них висуваються безпрецедентні вимоги щодо надійності та безвідмовності. Відповідно, процес їх функціонування має перебувати під безперервним та пильним контролем диспетчерських служб. Практична реалізація таких суворих вимог можлива виключно за умови використання телекомунікаційної інфраструктури з відповідним, найвищим рівнем надійності.

Після детального аналізу варіантів, як оптимальне технічне рішення було обрано розгортання радіосистеми передачі даних, доповненої незалежним резервним каналом зв'язку. Така конфігурація найкращим чином задовольняла всі висунуті технічні умови. Для забезпечення безперебійної передачі телеметричної інформації було організовано два паралельні маршрути: основний та дублюючий. В обох випадках використовуються промислові радіомодеми, які функціонують на виділеній (ліцензованій) частоті в радіодіапазоні 400 МГц.

Загальну архітектурну структуру телеметричної системи STSP наочно

проілюстровано на рисунку 3.1.

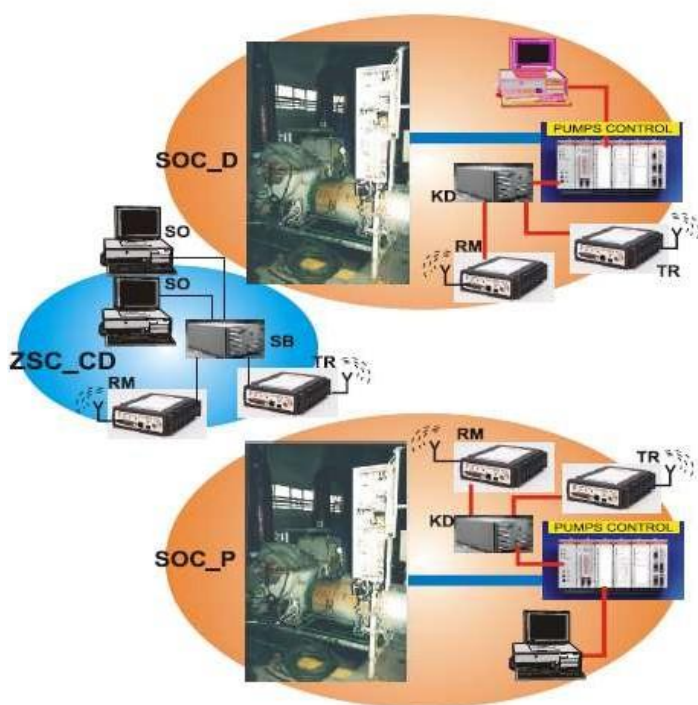


Рисунок 3.1 – Структурна організація телеметричної системи керування STSP для проміжних насосних станцій

Апаратно-програмний комплекс STSP складається з двох фундаментальних рівнів:

1. Центральний диспетчерський пункт управління тепловою мережею (позначається як ZSC_CD).
2. Локальні рівні — безпосередньо самі проміжні насосні станції (позначаються як SOC_D та SOC_P).

Для організації надійного та захищеного обміну даними між центральною диспетчерською та периферійними насосними станціями були інтегровані спеціалізовані промислові радіомодеми серії MDS 4710. На кожній з проміжних станцій змонтовано концентратори даних (KD). У свою чергу, на території центрального диспетчерського пункту розгорнуто базову станцію (SB). Ця базова станція відіграє роль шлюзу, забезпечуючи двосторонній зв'язок з віддаленими об'єктами за участю двох додаткових автоматизованих робочих місць (станцій) оператора SCADA, які скорочено позначаються як SO.

На операторські станції (SO) покладено виконання таких критичних завдань: 3) Наочна графічна візуалізація всього масиву отриманих

телеметричних даних, що дозволяє оператору в режимі реального часу оцінювати поточний стан технологічного процесу. 4) Забезпечення інструментів для віддаленого керування обладнанням станції як в ручному (директивному) режимі, так і в режимі параметричного (автоматичного) налаштування. 5) Формування та ведення захищених баз даних (архівування) історичної інформації.

Фізично операторські станції розміщені в головній залі центрального диспетчерського пункту. Вони надають персоналу можливість здійснювати дистанційне управління насосною станцією за допомогою одного з двох доступних алгоритмів: 6) Режим оператора (аварійний ручний режим) — активується переважно у випадку виникнення нештатних (аварійних) ситуацій на об'єкті або під час проведення планово-попереджувальних ремонтних робіт чи технічного обслуговування. 7) Автоматичний режим (параметричний) — використовується для дистанційного введення та коригування заданих уставок (параметрів) для автономної підсистеми локального автоматичного регулювання, яка знаходиться безпосередньо на самій станції.

Кожна з операторських станцій (СО) працює як незалежний вузол, автономно зчитуючи пакети актуальних даних з центральної базової станції (СБ). Процес обміну інформацією між ними здійснюється через стандартний послідовний комунікаційний інтерфейс. Оскільки підключення та інтеграція базових станцій (СБ) реалізовано з використанням відкритих та загальноприйнятих промислових протоколів, це відкриває широкі можливості для впровадження практично будь-якого сучасного програмного забезпечення для візуалізації та керування процесами (SCADA). Один з можливих прикладів графічної реалізації такого інтерфейсу користувача наведено на рисунку 3.2.

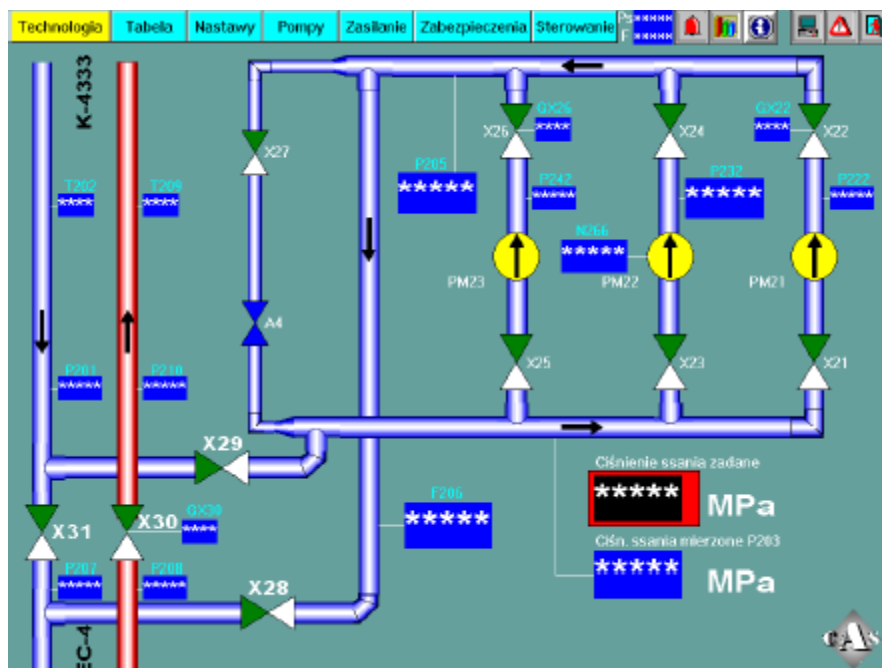


Рисунок 3.2 – Приклад графічного виконання людино-машинного інтерфейсу (HMI) для моніторингу та керування насосною станцією

Головною функцією базової станції (СБ) є безперервний та циклічний збір (опитування) даних від віддалених концентраторів (KD). Для цього використовуються радіомодеми типу MDS 4710E, які здійснюють передачу через один із налаштованих доступних радіоканалів зв'язку. У свою чергу, концентратори даних відіграють ключову роль у забезпеченні гарантованої та надійної ретрансляції інформації. Використання незалежних маршрутів передачі даних кардинально підвищує загальний рівень стійкості (відмовостійкості) всієї системи. Навіть у випадку проведення регламентних робіт на одному з каналів або його раптового виходу з ладу, зв'язок не переривається. Крім того, всі пакети даних, що передаються в ефір, надійно захищені від випадкових спотворень або навмисного втручання (завад). Протокол передачі передбачає суворий контроль цілісності потоку: якщо на приймальній стороні виявляється пошкоджений пакет, система автоматично ініціює запит на його повторну відправку.

Безперебійна робота телеметричного комплексу та систем локального керування не повинна залежати від наявності або відсутності напруги в загальній електромережі. Це завдання вирішується шляхом встановлення джерел безперебійного живлення (ДБЖ). Ліва частина алгоритмів керування та складних контурів регулювання реалізується на рівні основних контролерів (SP).

Специфічні та локальні завдання делеговані місцевим мікроконтролерам, які об'єднані з основними пристроями в єдину інформаційну мережу за допомогою спільної промислової шини передачі даних.

Функціонал будь-якого основного контролера обов'язково включає виконання таких завдань: 8) Комплексне автоматизоване керування всією сукупністю виконавчих механізмів та пристроїв, що входять до складу гідравлічної системи насосної станції. 9) Безперервний моніторинг параметрів електромережі та керування системою внутрішнього живлення станції. 10) Інтеграція, моніторинг та управління допоміжними системами безпеки: контролем санкціонованого доступу, комплексами пожежної сигналізації та датчиками контролю затоплення (витоків). 11) Суворий контроль та фіксація всіх спроб доступу до функцій дистанційного телемеханічного керування станцією.

Апаратна та програмна архітектура як основних, так і місцевих контролерів спроектована таким чином, щоб забезпечити їх повну автономність. У випадку втрати зв'язку з центральним диспетчерським пультом, вони продовжують бездоганно виконувати всі закладені в них функції регулювання та захисту.

Місцеві контролери фокусуються переважно на завданнях детального моніторингу та безпосереднього управління роботою електродвигунів насосних агрегатів. Це управління здійснюється шляхом генерації керуючих сигналів для відповідних перетворювачів частоти (інверторів), а на більш високому рівні їхня робота координується основним контролером. Спрощена структурна схема, що пояснює принцип взаємодії контролерів з насосними агрегатами, представлена на рисунку 3.3.

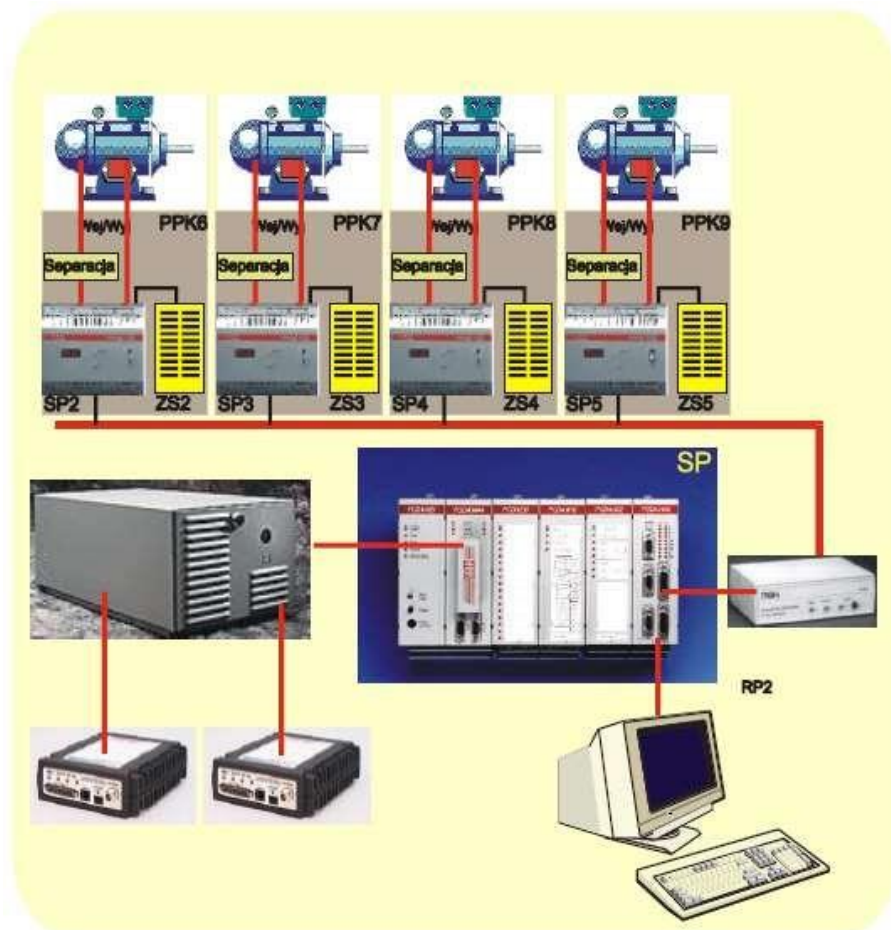


Рисунок 3.3 – Структурна блок-схема системи управління насосними агрегатами на базі програмованих контролерів

До зони відповідальності місцевих контролерів відносяться такі специфічні задачі:

1. Безперервне виконання діагностичних алгоритмів для перевірки коректності функціонування та технічного стану насосних агрегатів.
2. Локальний збір та первинна обробка результатів вимірювань обраних технологічних параметрів (з датчиків).
3. Збереження та можливість оперативного налаштування локальних констант та параметрів регулювання.
4. Оперативне виявлення перших ознак підтоплення приміщення, що виникають внаслідок поривів труб або порушення герметичності ущільнень.
5. Опитування аналогових датчиків вібрації, температурних сенсорів, датчиків положення робочих органів заслінок. Контролери здійснюють цифрову фільтрацію цих сигналів (для усунення завад) та постійно порівнюють поточні

значення з максимально допустимими (критичними) межами.

Архітектура системи передбачає встановлення індивідуального місцевого контролера для кожного окремого насосного агрегату. Основний контролер, використовуючи послідовний інтерфейс обміну даними, циклічно (з високою частотою) зчитує масив моніторингової інформації з усіх місцевих пристроїв. У випадку, якщо хоча б один з критичних параметрів (наприклад, температура або вібрація) перевищує встановлений ліміт, основний контролер негайно формує команду на аварійне відключення відповідного агрегату.

Для забезпечення ефективного захисту, підшипникові вузли електродвигунів обладнані високоточними платиновими термоопорами (датчиками температури типу РТ100) та чутливими п'єзоелектричними датчиками вібрації. Для мінімізації ризиків аварійних зупинок проміжних насосних станцій через затоплення, впроваджено надійну систему контролю витоків води. Вбудоване програмне забезпечення місцевих контролерів гнучко налаштоване з урахуванням специфіки роботи конкретної системи. Алгоритм реагування передбачає активацію тривоги лише у випадку фіксації значного за обсягом витоку, який призводить до безперервного замикання контактів датчика протягом щонайменше 5 хвилин (захист від хибних спрацювань через конденсат або дрібні бризки). Такий підхід гарантує, що система ідентифікує та реагує виключно на ті інциденти, які становлять реальну, а не потенційну небезпеку для працездатності проміжної насосної станції. Додатково, у місцях проходження магістральних трубопроводів змонтовані спеціалізовані датчики підтоплення, які інтегровані в загальний контур системи запобігання масштабним проривам [2].

3.1.2 Керування насосами для покращення енергоефективності

У цьому розділі пропонується детальний розгляд запатентованого технічного рішення (патент США US 9,181,953 B2), розробленого колективом американських інженерів-винахідників у складі Перрі С. Стеджера та Девіда Марка Пірса. Назва цього патенту повністю співпадає з тематикою даного підрозділу і стосується інноваційних підходів до енергозбереження.

Суть даного винаходу полягає у розробці комплексної системи та

спеціалізованого алгоритмічного методу керування роботою насосного обладнання з головною метою — кардинального підвищення рівня його загальної енергетичної ефективності. Згідно з описом, розроблена технологія може застосовуватися на насосних станціях, які укомплектовані як одним, так і декількома паралельно працюючими насосними агрегатами. Впроваджена система автоматизованого керування (САК) наділена функціоналом для безперервного та синхронного вимірювання двох ключових параметрів: миттєвого значення споживаної електричної потужності всіма активними насосами та миттєвого об'ємного значення подачі води у магістраль. На основі цих двох вимірюваних величин, математичний апарат системи в режимі реального часу розраховує критично важливий показник — миттєве специфічне споживання енергії (Specific Energy Consumption – скорочено SEC). Цей параметр відображає кількість витраченої електроенергії на перекачування одиниці об'єму рідини. Після розрахунку SEC, система автоматики генерує керуючі впливи для динамічного коригування швидкості обертання принаймні одного з працюючих насосів. Критерієм для зміни швидкості є розрахована поточна величина миттєвого SEC. Унікальність алгоритму полягає в тому, що САК здатна циклічно і багаторазово повторювати описану послідовність кроків (вимірювання - розрахунок - коригування обертів) за принципом зворотного зв'язку, поступово наближаючись до режиму роботи з мінімально можливим (найбільш оптимальним) значенням миттєвого SEC для даної насосної станції.

Загальна концептуальна блок-схема запропонованої інноваційної системи керування насосною станцією детально проілюстрована на рисунку 3.4.

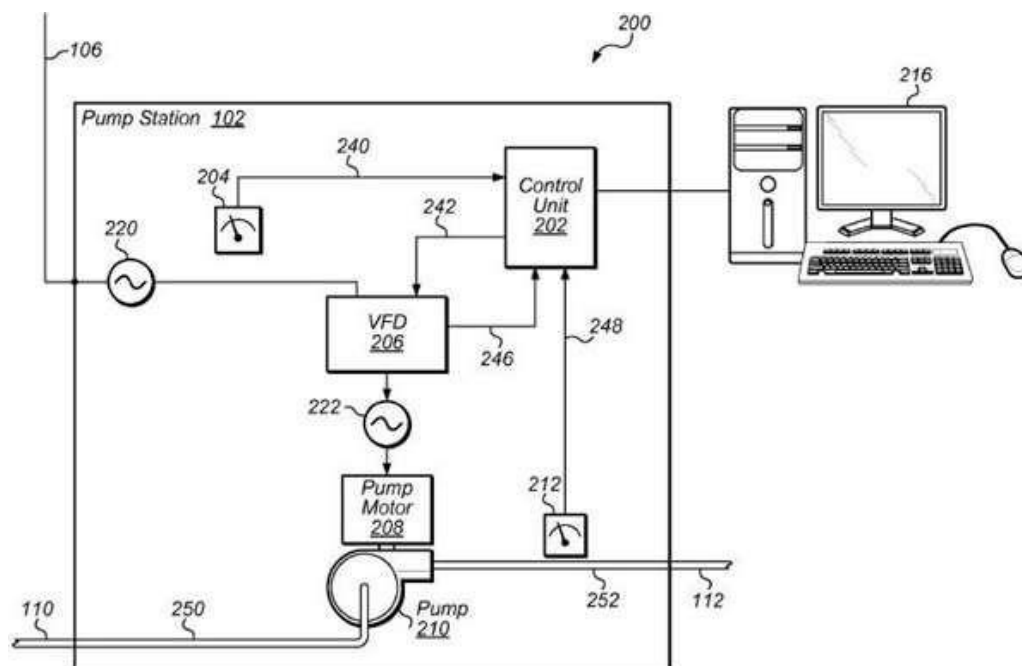


Рисунок 3.4 – Принципова блок-схема системи управління насосною станцією згідно з патентом US 9,181,953 B2

Алгоритм передбачає, що зміна кутової швидкості обертання валу насосів відбувається кроками, і напрямок цієї зміни (тобто рішення про збільшення чи зменшення обертів) визначається результатами порівняння. САК постійно порівнює щойно розрахований (поточний) показник миттєвого SEC з його попереднім зафіксованим значенням. Якщо система виявляє, що поточне значення SEC стало більшим за попереднє (тобто енергоефективність погіршилась внаслідок попереднього кроку регулювання), логіка керування негайно змінює напрямок (вектор) коригування швидкості на діаметрально протилежний. Наприклад, якщо до цього контролер поступово збільшував частоту обертання і це призвело до зростання SEC, система змінить алгоритм і почне знижувати швидкість (або навпаки — якщо швидкість зменшували, і SEC зріс, система почне збільшувати частоту обертання). Фізично процес зміни швидкості обертання насосів реалізується за допомогою силових частотних перетворювачів.

Для кращого розуміння енергетичних процесів на рисунку 3.5 зображено графіки, які ілюструють еволюцію напірно-витратних характеристик насоса при різних частотах напруги живлення електроприводу (позначені кривими 300 та 302), а також криву гідравлічного опору самої мережі (крива 304).

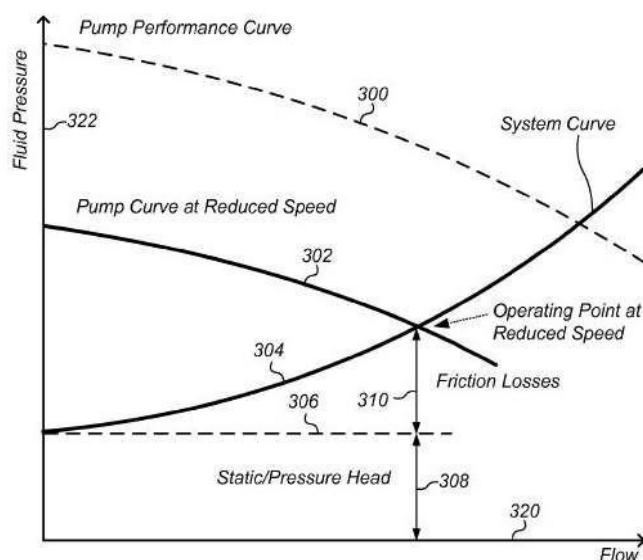


Рисунок 3.5 – Сімейство напірно-витратних характеристик насоса при зміні частоти струму живлення (300, 302) у взаємодії з характеристикою гідравлічної мережі (304)

Як зазначалося раніше, запатентований метод є легко масштабованим і може ефективно застосовуватися для оптимізації роботи цілої групи (каскаду) насосів у межах однієї станції. У такому розширеному варіанті базовий алгоритм керування розгортається у таку послідовність операцій:

1. Ініціалізація початкового напрямку зміни швидкості обертання (встановлення прапорця на "збільшення" або "зменшення").
2. Збір даних щодо поточного миттєвого споживання електричної енергії всім комплексом насосної системи.
3. Визначення поточного миттєвого значення загального об'єму води (витрати), що подається системою.
4. Проведення математичного розрахунку актуального миттєвого показника SEC для всієї насосної станції, використовуючи дані про загальну потужність та сумарну подачу.
5. Виконання логічної операції порівняння щойно обчисленого поточного SEC із значенням, збереженим на попередньому циклі ітерації.
6. Якщо алгоритм фіксує, що поточний SEC перевищив попередній (ефективність впала), система інвертує (змінює на протилежний) раніше обраний напрямок зміни швидкості.

7. Формування відповідного керуючого сигналу та безпосереднє регулювання (через інвертор) швидкості обертання одного з обраних насосів у каскаді згідно з новим, скоригованим напрямком.

Варто підкреслити, що ітераційний цикл вимірювань та розрахунків (кроки з 2 по 4) може повторюватися з високою частотою для кожного окремого насоса, що бере участь у регулюванні. Більше того, весь комплекс кроків від 1 до 4 може багаторазово виконуватися індивідуально для кожного агрегату у багатонасосній конфігурації, забезпечуючи точне тонке налаштування всієї системи.

На рисунку 3.6 представлено серію емпіричних графіків, які наочно демонструють нелінійну залежність специфічного споживання енергії (SEC) від сумарної об'ємної подачі станції за умови одночасної роботи різної кількості насосних агрегатів (крива 406 ілюструє роботу одного насоса, крива 408 — двох паралельних насосів, крива 410 — трьох, а крива 412 — групи з чотирьох агрегатів).

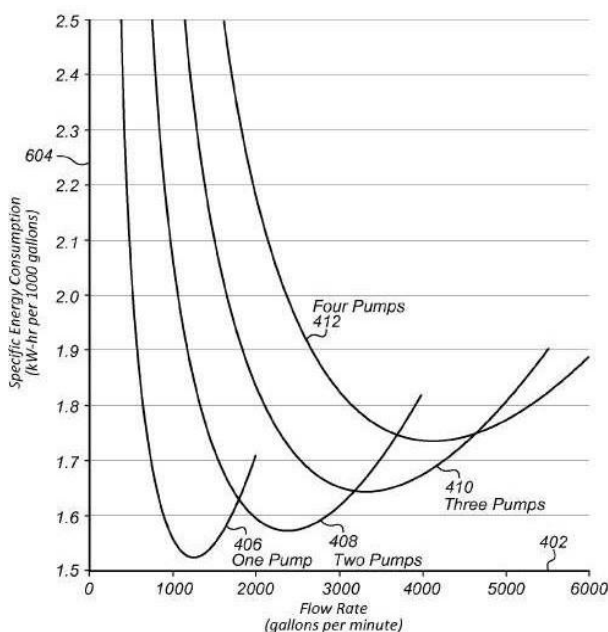


Рисунок 3.6 – Сімейство кривих залежності параметру SEC від сумарної подачі води для конфігурацій з одним (406), двома (408), трьома (410) та чотирма (412) працюючими насосами [3]

3.1.3 Автоматизована система керування насосною станцією

У даному підрозділі здійснюється детальний аналіз корисної моделі, зареєстрованої в Україні згідно з патентом UA 51109. Назва цього патенту

повністю відображає зміст і предмет розгляду даного розділу. Автором та розробником даної корисної моделі є український винахідник Хазнаферов Михайло Васильович.

Заявлена корисна модель належить до класу спеціалізованих технічних пристроїв, призначених для комплексної автоматизації процесів керування експлуатаційними режимами насосних станцій. Головною сферою практичного застосування цього винаходу є об'єкти та інфраструктура житлово-комунального та промислового водопостачання. Для кращого розуміння архітектури та принципів взаємодії компонентів, на рисунку 3.7 представлена структурна блок-схема запропонованої системи.

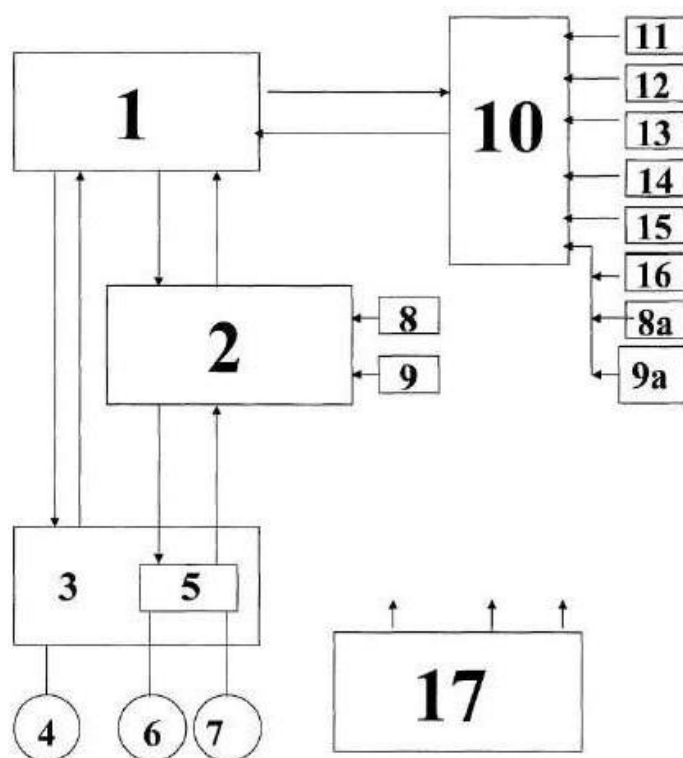


Рисунок 3.7 – Принципова блок-схема архітектури автоматизованої системи керування насосною станцією згідно з патентом UA 51109

Базова комплектація описаної автоматичної системи управління насосною станцією включає в себе центральний блок керування (позначений цифрою 1). До цього головного модуля електрично та інформаційно підключено силовий перетворювач частоти (2), що відповідає за частотне регулювання (скорочено ПЧ), а також спеціалізований блок комутації (3). До силових виходів блоку комутації приєднано насосне обладнання: базовий насосний агрегат (4), який

працює в режимі нерегульованої продуктивності (прямий пуск від мережі), та два насосні агрегати (6 та 7), швидкість яких плавно регулюється за допомогою ПЧ. Важливою конструктивною особливістю є те, що регульовані насоси (6 і 7) підключені до ПЧ за жорсткою логічною схемою "ВИКЛЮЧНЕ АБО" (що унеможлиблює їхню одночасну роботу від одного інвертора). Також до центрального блоку підведені сигнали від двох датчиків тиску (8 і 9), які змонтовані на вихідному (напірному) колекторі станції. Ці датчики взаємно дублюють один одного і виконують критичну функцію — формують безперервний сигнал зворотного зв'язку (фактичний тиск у мережі), на основі якого логіка блоку керування 1 приймає обґрунтовані рішення щодо необхідності пуску, зупинки або зміни продуктивності насосних агрегатів. Окрім базової частини, система оснащена розширеним модулем — додатковим програмованим логічним контролером (ПЛК) (10). До цього ПЛК підключено цілий масив інформаційних сенсорів: дублюючі датчики зворотного зв'язку (8а, 9а), а також датчики (11, 12, 13, 14, 15, 16), які фіксують широкий спектр вхідних та вихідних технологічних параметрів. Роль цього додаткового ПЛК (10) полягає у здійсненні глибокого, комплексного моніторингу стану всієї станції шляхом аналізу показників з розширеної мережі датчиків. На основі цього аналізу, ПЛК формує і передає на центральний блок керування 1 уточнений (скоригований) сигнал зворотного зв'язку, використовуючи для цього власні прецизійні датчики (8а, 9а). Електричне живлення всієї слабкострумової та керуючої апаратури забезпечується спеціалізованим блоком живлення (17).

Масив датчиків для контролю параметрів системи включає наступні елементи: датчики (8а, 9а) безперервно вимірюють тиск води безпосередньо у вихідному колекторі; датчик (11) контролює сам факт наявності потоку води, що надходить на вхід станції; датчик (12) фіксує значення тиску у вхідному колекторі (тиск підпору); датчик (13) вимірює напір безпосередньо на вихідних патрубках насосів; датчик (14) підтверджує наявність потоку води, що виходить зі станції в магістраль; витратомір (15) забезпечує комерційний або технологічний облік витрати води споживачами; рівнемір (16) контролює запаси води в накопичувальних резервуарах чистої води (РЧВ). Як зазначалося, пара

датчиків (8а та 9а) виділена спеціально для генерування надійного сигналу зворотного зв'язку для керуючих алгоритмів блоку 1.

Типовий алгоритм функціонування даної автоматичної системи управління виглядає наступним чином. Оператор, працюючи з меню пульта управління (ПУ), який інтегрований у блок керування 1, обирає основний режим роботи станції. У даному випадку активуються режими "ПЧ" (управління через перетворювач частоти) та "А" (повністю автоматичний режим). Силова частина системи (ПЧ 2) отримує живлення від трифазної мережі напругою 380 В. Після натискання кнопки або надходження логічного сигналу "Set" (Пуск/Запуск) з ПУ, блок керування 1 ініціалізує включення ПЧ 2. Після успішного тестування ПЧ 2 формує і відправляє в блок 1 логічний сигнал готовності до роботи. Отримавши цей сигнал, програмований контролер, розташований усередині блоку 1, автоматично завантажує в енергонезалежну пам'ять ПЧ необхідний масив робочих налаштувань (так званий "перший набір параметрів"), який оптимізовано для роботи із стандартними датчиками зворотного зв'язку (33). На графічному дисплеї ПУ в режимі реального часу починає відображатися поточний стан перетворювача (ПЧ 2) та його ключові експлуатаційні параметри (споживаний струм двигуна, частота, розраховані оберти тощо). Наступним кроком оператор через інтерфейс ПУ має вибрати, який саме датчик тиску (8 або 9) буде використовуватися як основне джерело сигналу 33. Далі оператор вводить бажане значення тиску (уставку), яке система повинна підтримувати у вихідному колекторі. Цей заданий параметр перетворюється на відповідний аналоговий або цифровий сигнал і подається безпосередньо на вхід ПД-регулятора, вбудованого в ПЧ 2. Відповідно до алгоритму, система приймає рішення про запуск одного з регульованих насосних агрегатів (НА 6 або НА 7), сигнал на пуск якого проходить через логічний блок "ВИКЛЮЧНЕ АБО". Одночасно з цим, інвертор (ПЧ 2) починає генерувати і подавати керовану напругу змінної частоти на обмотки статора обраного електродвигуна (НА 6 або 7). Двигун запускається, і починається процес плавного частотного розгону, який триває протягом заздалегідь запрограмованого часу. Розгін триває доти, доки швидкість обертання ротора не досягне значення, достатнього для створення в

системі тиску, що дорівнює заданій уставці.

Якщо виникає технологічна необхідність зупинити працюючий регульований агрегат (НА 6 або 7), оператор на пульті управління блоку 1 активує команду «Стоп». Отримавши цю команду, перетворювач частоти (2) не просто миттєво обриває коло живлення, а починає плавно знижувати частоту і напругу на обмотках електродвигуна. Відбувається процес так званого керованого гальмування (вибігу) протягом заданого проміжку часу, що запобігає гідравлічним ударам у трубопроводах. Технічна реалізація логіки «ВИКЛЮЧНЕ АБО» (елемент 5 на схемі) виконана на базі потужних силових контакторів, розміщених всередині блоку комутації (3). Центральний блок керування (1) бере на себе функцію постійного нагляду за тим, щоб силові контакти перемикалися коректно і без помилок. Серцем блоку керування 1 є сучасний мікропроцесорний програмований контролер, оснащений інформативним дисплеєм (НМІ-панеллю). Цей дисплей є вікном у систему, що відображає динаміку зміни всіх ключових параметрів в режимі реального часу. Крім того, функціонал контролера передбачає можливість віддаленого або локального програмного конфігурування (завантаження нових наборів параметрів) силового інвертора ПЧ 2. Що стосується нерегульованого насосного агрегату (НА 4), його пуск здійснюється прямим підключенням до мережі через контактори блоку комутації 3 за прямою командою від блоку керування 1. Рішення про доцільність підключення цього додаткового насоса до роботи приймає оператор станції шляхом зміни відповідних налаштувань в інтерфейсі блоку 1. Крім стандартного алгоритму, архітектура системи передбачає можливість переходу на більш інтелектуальний режим роботи, при якому процесом управління керує додатковий, більш потужний програмований контролер 10. Алгоритм роботи в цьому режимі концептуально схожий на базовий автоматичний режим. Однак, головна відмінність полягає в тому, що на вхід завдання частотного перетворювача 2 тепер подається вже повністю сформований та оптимізований керуючий аналоговий сигнал. Цей сигнал генерується додатковим контролером 10, який при розрахунку враховує показники з розширеного пулу датчиків (насамперед з прецизійних датчиків 33 8а та 9а) і передає його через транзитний ключ,

розміщений в блоці керування 1. Для активації цього інтелектуального режиму на панелі управління блоку 1 оператор обирає позицію «Р» (Режим розширеного керування). Отримавши черговий сигнал готовності від інвертора ПЧ 2, система ініціює завантаження до пам'яті інвертора нового, спеціально адаптованого набору налаштувань — так званого «другого набору параметрів». У цьому конфігураційному профілі стандартні датчики тиску 8 і 9 апаратно та програмно виключаються з контуру керування. Включення в алгоритми обробки масивів інформації від додаткових сенсорів (11, 12, 13, 14, 15, 16) кардинально підвищує загальний рівень інформативності системи (спостережуваність об'єкта). Це, у свою чергу, дозволяє мікропроцесору генерувати керуючі впливи, спираючись на всебічний аналіз значно більшої кількості змінних, що гарантовано підвищує точність і якість підтримання заданих технологічних режимів.

Резюмуючи вищевикладене, можна стверджувати, що запропоноване в рамках даного патенту технічне рішення щодо побудови автоматичної системи управління насосною станцією успішно вирішує поставлену проблему. Воно забезпечує відчутне підвищення загальної надійності та відмовостійкості всієї водопровідної системи в автоматичних режимах експлуатації. Це досягається завдяки грамотному резервуванню (дублюванню) найбільш критичних, функціонально значущих електронних та електромеханічних вузлів. Водночас, стабільна та високоточна робота системи керування в автоматичному режимі створює ідеальні умови для глибокої оптимізації процесів споживання електроенергії приводними двигунами насосних агрегатів. Як наслідок, це гарантує суттєве та економічно виправдане зниження питомих витрат енергії на перекачування води в масштабах всієї насосної станції, якщо порівнювати цю розробку з іншими аналогічними, традиційними технічними рішеннями, представленими на ринку [4].

3.2 Формування завдання на проектування та аналіз вихідних даних

3.2.1 Детальна характеристика та поточний технічний стан діючої насосної станції як об'єкта автоматизації

За результатами проведення комплексного технічного та візуального

обстеження існуючої насосної станції водопостачання було зібрано масив вихідних даних. Спираючись на загальноприйняту класифікацію, яка детально розглядалася у попередньому підрозділі 1.2, можна констатувати, що за своїм основним технологічним призначенням даний об'єкт класифікується як типова водопровідна станція, яка спеціалізується виключно на перекачуванні чистої холодної води. Якщо розглядати просторове розташування та функціональну роль цього об'єкта в загальній топології міської мережі водопостачання, то станція належить до категорії підвищувальних, тобто так званих бустерних станцій або станцій підкачки. Її головна експлуатаційна задача зводиться до локального та стабільного підвищення гідростатичного напору води для забезпечення безперебійного водопостачання мешканців багатоповерхової забудови конкретного житлового масиву, який знаходиться в зоні її обслуговування.

Оцінюючи категорію надійності електропостачання та безперебійності роботи, обстежувана насосна станція віднесена до третьої категорії. Згідно з нормативними документами, це означає, що технологічний регламент допускає ймовірність тимчасової перерви у водопостачанні споживачів у разі виникнення серйозних аварійних ситуацій чи відмов обладнання, однак максимальний термін такої зупинки суворо обмежений і не може перевищувати одну добу. З точки зору архітектурно-будівельних рішень, конструктивних особливостей та специфіки монтажу обладнання, цей об'єкт ідентифіковано як насосну станцію наземного типу розміщення. Екстер'єр будівлі наведено на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Екстер'єр та архітектурне виконання наземної будівлі насосної станції

Машинний зал насосної станції на даний момент укомплектований двома абсолютно ідентичними перекачувальними блоками. Кожен з них являє собою сучасний вертикальний багатосекційний (багатоступеневий) насосний агрегат, який базується на конструкції відцентрового насоса, жорстко зчленованого з трифазним асинхронним електричним двигуном. Виробником даного насосного обладнання є відома світова компанія «Grundfos». Зовнішній вигляд змонтованого агрегата крупним планом наведено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд встановленого багатоступеневого насосного агрегата

Встановлені насосні агрегати модифікації CR10-04 A-FJ-A-E-HQQE характеризуються розширеним переліком технічних та експлуатаційних параметрів, які закладені заводом-виробником. Типом робочого середовища є підготовлена вода, а допустимий діапазон її робочих температур становить від 20 °C до 120 °C, при цьому номінальна розрахункова температура під час нормальної експлуатації дорівнює 20 °C. Густина робочого середовища за номінальної температури складає 998,2 кг/м³. Номінальна швидкість обертання валу насоса при стандартній частоті струму 50 Гц досягає 2896 обертів на хвилину. Паспортна номінальна продуктивність, або подача, становить 10 м³/год, а номінальний напір — 31,9 метрів водяного стовпа. Гранично допустимий

максимальний напір агрегата може сягати 40,8 метрів водяного стовпа. Максимально допустима температура навколишнього повітря в машинному залі обмежена позначкою 60 °С, а граничний робочий тиск у системі, у тому числі за умов перекачування рідини з максимальною температурою 120 °С, не повинен перевищувати 16 бар. Конструктивно передбачено, що умовний діаметр обох фланців становить DN 40, а номінальний тиск монтажного підключення арматури дорівнює PN 25. У якості приводу застосовано електродвигун типу 100LC з номінальною механічною потужністю на валу 1,5 кВт, і саме така фактична енергія споживається гідравлічною частиною насоса. Електроживлення здійснюється від трифазної мережі з номінальною напругою 230-277D / 400-480Y Вольт. Діапазони номінального робочого струму лежать у межах 10,5-9,35 А або 6,00-5,40 А, при цьому кратність пускового струму відносно номінального сягає 910-1100 %, а коефіцієнт потужності електродвигуна становить 0,90-0,84. Коефіцієнт корисної дії електродвигуна при повному навантаженні дорівнює 88,5 %, за умови роботи на три чверті від номінального навантаження він становить 87,9-87,8 %, а при половинному навантаженні — 88,2-85,4 %. Власний гідравлічний ККД насосної частини складає 67,4 %, а мінімально допустимий індекс енергоефективності становить не менше 0,57. Конструктивна кількість магнітних полюсів статора дорівнює двом.

Дослідження динаміки роботи обладнання вимагає аналізу його графічних залежностей. На рисунку 3.10 наведено сімейство робочих напірно-витратних характеристик для одного насосного агрегата, які побудовані для різних значень частоти напруги живлення статорних обмоток (зокрема для 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20 та 12,5 Гц відповідно).

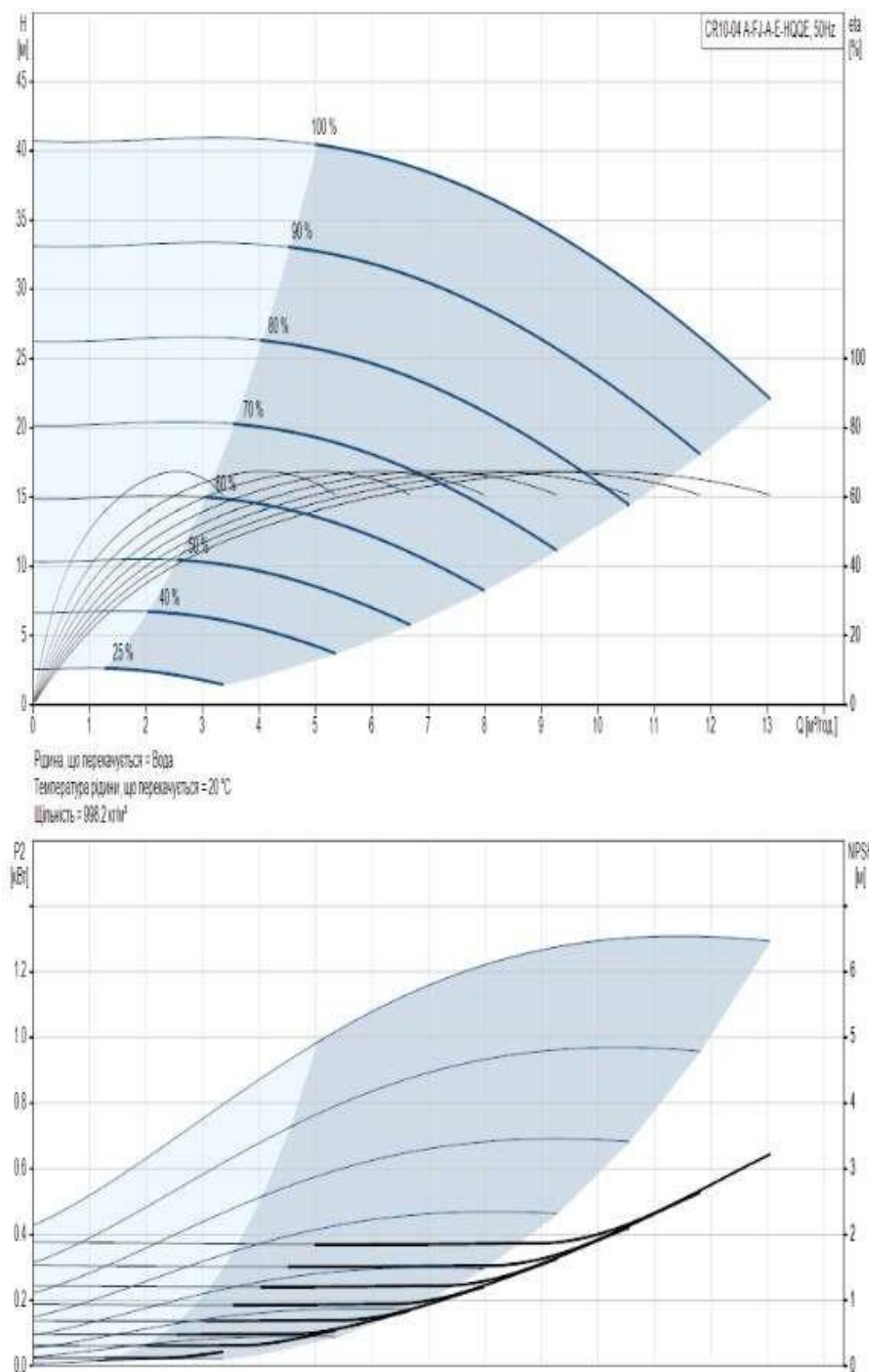


Рисунок 3.10 – Графіки робочих (напірно-витратних) характеристик насоса марки CR10-04 A-FJ-A-E-HQQE [5]

Під час аудиту було встановлено, що на даний момент керування величиною напору та тиску у під'єднаній гідравлічній системі здійснюється вкрай неефективним методом — шляхом прямого дроселювання потоку води.

Цей процес реалізується механічним шляхом за рахунок ручної зміни ступеня відкриття масивних клиновидних засувок, встановлених на напірних магістралях. Панорамний вигляд інтер'єру приміщення станції, де розміщено

технологічне обладнання, трубопровідну обв'язку та запірно-регулюючу арматуру, представлений на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 – Внутрішнє компонування машинного залу та технологічного устаткування станції

Система захисної автоматики також потребує радикального оновлення. Наприклад, для моніторингу наявності тиску води на всмоктувальному колекторі досі використовується електромеханічне реле тиску серії РД-8Т, вироблене ще за часів Радянського Союзу, яке повністю вичерпало свій фізичний та моральний ресурс. Зовнішній вигляд цього реле зафіксовано на рисунку 3.12.



Рисунок 3.12 – Електромеханічне реле тиску РД-8Т (захист від «сухого ходу»)

Засоби візуальної індикації поточних параметрів представлені класичними стрілочними манометрами пружинного типу. Вони змонтовані як на входних, так

і на вихідних патрубках агрегатів, і їхні покази можуть бути зчитані лише за умови фізичної присутності оператора в машинному залі. Один з таких приладів проілюстровано на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13 – Стрілочний манометр для візуального контролю тиску

Функція автоматизованого контролю рівня тиску безпосередньо на виході насосних агрегатів у напірному колекторі забезпечується за допомогою аналогового перетворювача тиску, зовнішній вигляд якого можна побачити на рисунку 3.14.



Рисунок 3.14 – Вимірювальний перетворювач (датчик) тиску на напірному колекторі

Що стосується обліку води, на станції змонтовано комерційний витратомір, однак він функціонує як абсолютно автономний прилад і ніяк не інтегрований в загальну електричну схему регулювання чи диспетчеризації. Моніторинг фактичних обсягів води, що подається споживачам, здійснюється виключно

шляхом візуального зняття показників диспетчером або оператором. Конструкція встановленого витратоміра наведена на рисунку 3.15.



Рисунок 3.15 – Прилад комерційного/технологічного обліку витрати води

Аналіз гідравлічної обв'язки виявив серйозний конструктивний недолік, оскільки клапаном зворотного ходу, який запобігає зворотному перетоку води при зупинці насоса, укомплектовано лише одну з двох насосних ліній. Крім того, сама механічна конструкція встановленого зворотного клапана не передбачає можливості інтеграції кінцевих вимикачів чи інших сенсорів для віддаленого моніторингу фізичного положення його внутрішньої заслінки. Фотографія даного елемента арматури розміщена на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16 – Зворотний клапан у розрізі (без можливості моніторингу положення)

Комплексна безпека об'єкта перебуває на критично низькому рівні, адже на станції повністю відсутні технічні засоби для виявлення протікань або підтоплення машинного залу. Крім того, інфраструктура приміщення не

оснащена жодними елементами систем пожежної автоматики та охоронної сигналізації, що робить станцію вразливою до актів вандалізму або займань. Враховуючи вищевикладене, наразі весь тягар відповідальності за моніторинг технічного стану агрегатів, управління масивними засувками, збір показників та комунікацію з диспетчером міськводоканалу лежить виключно на людині-операторі, що зумовлює вплив людського фактору та перевитрати енергії.

3.2.2 Вимоги технічного завдання від підприємства-замовника щодо автоматизації насосної станції

Базуючись на висновках технічного аудиту та спираючись на стратегію модернізації, інженерно-технічною службою комерційного підприємства, яке є балансоутримувачем даної насосної станції, було розроблено та офіційно затверджено детальне Технічне завдання. До ключових вимог цього документа належить, насамперед, повна відмова від застарілого методу дроселювання. Замість нього необхідно впровадити систему плавного керування продуктивністю насосних агрегатів, що базуватиметься на використанні перетворювачів частоти для безперервної зміни швидкості обертання роторів електродвигунів. Також вимагається провести демонтаж фізично зношеного електромеханічного реле тиску, яке виконувало функцію захисту від сухого ходу на всмоктувальній магістралі, та замінити його на сучасний високоточний аналоговий перетворювач тиску. Крім того, необхідно модернізувати напірний вузол, обладнавши вихідну лінію кожного окремого насосного агрегату індивідуальним датчиком тиску для забезпечення точного контролю навантаження на кожен насос.

Архітектуру системи управління слід побудувати на базі сучасного вільно програмованого логічного контролера, який повинен взяти на себе функції збору даних з усіх сенсорів, обробки команд від центрального диспетчера та безпосереднього генерування керуючих впливів. Для цього потрібно організувати надійний канал телемеханічного зв'язку між локальним контролером станції та робочим місцем центрального диспетчера, використовуючи захищений радіоканал. В алгоритмах керування станцією

обов'язково треба передбачити можливість переходу між локальним ручним та повністю автоматизованим режимами роботи. Важливою вимогою є розробка та інтеграція локального людино-машинного інтерфейсу, для чого необхідно змонтувати в шафі керування сенсорну панель та написати відповідне програмне забезпечення. Для мінімізації наслідків потенційних аварій слід створити підсистему захисту від затоплень, обладнавши найнижчі точки машинного залу датчиками рівня рідини із виведенням сигналізації. З метою протипожежного захисту в приміщенні має бути інстальований комплект пожежних сповіщувачів для раннього виявлення займань, а для унеможливлення непомітного проникнення сторонніх осіб необхідно впровадити підсистему охоронної сигналізації з магнітоконттактними датчиками та датчиками руху.

3.2.3 Деталізоване завдання на проектування системи автоматизації

Орієнтуючись на глобальну мету кваліфікаційної роботи, результати глибокого аналізу поточного технічного стану насосного обладнання, а також беручи до уваги жорсткі вимоги затвердженого Технічного завдання, було сформовано кінцевий перелік конкретних інженерних та науково-дослідних задач. Ці задачі становлять основу завдання на проектування нової системи автоматизованого керування насосною станцією і включають цілий ряд послідовних кроків. Спочатку необхідно провести аналітичне порівняння та здійснити обґрунтований вибір найефективнішого математичного алгоритму керування паралельною роботою насосних агрегатів із застосуванням частотно-регульованого електроприводу. Після цього слід розробити модернізовану принципову гідравлічну схему станції, яка б повністю задовольняла нові вимоги технічного завдання щодо місць встановлення контрольно-вимірювальних приладів. Наступним кроком є формування загальної ієрархічної структурної концепції системи автоматизації з визначенням рівнів збору інформації та прийняття рішень.

Далі необхідно здійснити інженерний розрахунок, підбір та детальний опис номенклатури всіх технічних засобів автоматизації, необхідних для фізичної реалізації розробленої системи. Важливим етапом є виконання 3D-моделювання

та розробка інноваційної конструкції клапана зворотного ходу в середовищі Onshape, яка повинна передбачати можливість апаратного моніторингу положення заслінки. Також вимагається розробити розгорнуту структурну схему комплексу технічних засобів та детальну функціональну схему автоматизації, на якій будуть відображені всі контури контролю. Потім потрібно спроектувати повну електричну принципову схему з'єднань шафи автоматики, включаючи силові кола та кола управління.

Програмна частина завдання передбачає розробку логічної блок-схеми алгоритму функціонування та написання програмного коду для контролера. Для перевірки прийнятих рішень необхідно побудувати динамічну математичну модель відцентрового насосного агрегата, який працює в умовах частотного регулювання, та здійснити її імітаційне тестування в середовищі Matlab/Simulink. За результатами тестування потрібно виконати глибокий аналіз даних, оцінити ступінь відповідності моделі реальним характеристикам та перевірити стійкість роботи системи. На завершення слід розробити окремий розділ, присвячений заходам з охорони праці та техніки безпеки під час монтажу й подальшої експлуатації модернізованої насосної станції.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було проведено детальний огляд патентної інформації та сучасної технічної літератури щодо систем керування насосними станціями. Аналіз телеметричної системи STSP, алгоритмів оптимізації питомого споживання енергії (SEC) та запатентованих систем автоматичного керування показав, що передові інженерні рішення незмінно базуються на використанні програмованих логічних контролерів, перетворювачів частоти та надійних систем віддаленої диспетчеризації. Це повністю підтверджує необхідність та доцільність впровадження інтелектуальних мікропроцесорних засобів для підвищення загальної енергоефективності й надійності процесу водопостачання.

За результатами комплексного технічного аудиту діючої підвищувальної насосної станції було виявлено її суттєву моральну та фізичну застарілість. Встановлено, що керування параметрами мережі наразі здійснюється вкрай

неефективним методом ручного дроселювання за допомогою засувки, а контрольно-вимірювальні прилади, зокрема реле тиску РД-8Т, повністю вичерпали свій ресурс. Крім того, на об'єкті відсутня автоматизована інтеграція комерційних витратомірів, наявні зворотні клапани не пристосовані для електронного моніторингу їхнього стану, а життєво необхідні системи захисту від пожежі, затоплення та несанкціонованого доступу взагалі відсутні.

На основі виявлених недоліків та чітких вимог підприємства-замовника було сформовано й деталізовано кінцеве завдання на проектування нової системи автоматизованого керування. Це завдання вимагає повної відмови від застарілих методів регулювання на користь плавного керування продуктивністю насосів за допомогою частотних перетворювачів, кардинального оновлення парку вимірювальних приладів та впровадження комплексних підсистем безпеки. Для успішної реалізації цих цілей визначено послідовні кроки, що включають обґрунтування алгоритмів, підбір апаратних засобів, 3D-моделювання вдосконаленого зворотного клапана, розробку програмного забезпечення для ПЛК та панелі оператора, а також створення динамічної математичної моделі агрегату в середовищі Matlab/Simulink для перевірки прийнятих рішень.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці в виробничому приміщенні насосної станції водопостачання комерційного підприємства міста

В даному розділі розглянуті питання охорони праці в виробничому приміщенні діючої насосної станції водопостачання комерційного підприємства міста, приведені можливі небезпечні фактори для обслуговуючого персоналу та проаналізовані мікрокліматичні умови праці, а також розглянуті питання убезпечення персоналу на випадок виникнення надзвичайних ситуацій.

Виробниче приміщення насосної станції розташоване в одноповерховій окремій будівлі.

Будівля включає в себе два приміщення, більше з яких представляє собою машинний зал, де розташоване все технологічне обладнання, а друге призначене для оператора. Вигляд приміщення машинного залу приведено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Вигляд приміщення машинного залу насосної станції

На рисунку 4.2 представлено вигляд приміщення для оператора.



Рисунок 4.2 – Вигляд ззовні приміщення для оператора

Аналізуючи стан насосної станції як ззовні, так і зсередини, можна визначити наступні небезпечні фактори з точки зору охорони праці [12, 14]:

Серед основних небезпечних факторів у приміщенні варто виділити можливість ураження електричним струмом. Це може статися внаслідок порушення ізоляції кабелів або проводів, відсутності гумових килимків безпосередньо біля шаф з електроприладами, а також через підтоплення насосних агрегатів у результаті пошкодження труб або контакту із незаземленими струмоведучими частинами. Крім того, існує значний ризик травмування через водопровідні труби, які перетинають майже все приміщення на висоті коліна людини і заважають безпечно пересуватися та обслуговувати обладнання. Додаткову небезпеку становлять відкриті оглядові люки, а також повна відсутність будь-яких попереджувальних табличок, написів, відповідних кольорових маркувань небезпечних місць чи спеціальних тимчасових огорож.

Також слід звернути увагу на недостатнє штучне освітлення машинного залу та приміщення оператора. Ця проблема виникла внаслідок того, що вікна, які мали б забезпечувати необхідне додаткове сонячне світло, були закладені цеглою, а для освітлення використовуються звичайні лампи розжарювання. Мікроклімат у приміщенні теж не відповідає нормам: два наявні обігрівачі пристрої є малоефективними і взимку не здатні створити комфортні умови для оператора, тоді як відсутність кондиціонера унеможлиблює досягнення комфорту в спекотну пору року. Негативний вплив на працівників посилює і постійний виробничий шум, який спричиняють працюючі насосні агрегати.

Варто наголосити, що освітлення робочого приміщення насосної станції має величезне значення з точки зору безпеки, продуктивності та комфорту працівників. Насамперед, достатнє освітлення гарантує безпеку, оскільки суттєво зменшує ризик травматизму та нещасних випадків на робочому місці. Погане ж світло може призвести до необачності, зіткнень з обладнанням або спотворення оцінки робочих ситуацій. Водночас якісне освітлення підвищує ефективність праці, адже в добре освітленому приміщенні люди краще концентруються, менше стомлюються і здатні повністю зосередитися на виконанні своїх завдань.

Не менш важливим є вплив світла на здоров'я працівників: його нестача може спричинити напругу для очей, головний біль та навіть погіршення зору. При надмірному зоровому напруженні люди відчувають втому значно швидше, що неминуче веде до зниження продуктивності. Окремо слід виділити безпеку самого обладнання на насосних станціях, яке часто вимагає додаткового освітлення для правильного обслуговування та ремонту. Якщо робоче місце освітлене неналежним чином, це може спровокувати неправильні дії з технікою та навіть призвести до аварій. Зрештою, добре освітлене робоче середовище забезпечує необхідну зручність та комфорт для персоналу, що є визначальним фактором для їхнього загального самопочуття та задоволення від роботи.

Отже, освітлення робочого приміщення насосної станції необхідне для забезпечення безпеки, ефективності, здоров'я працівників та зручності їхньої роботи. Тому важливо правильно розрахувати штучне освітлення в будівлі насосної станції. На рисунку 4.3 приведено план будівлі насосної станції.

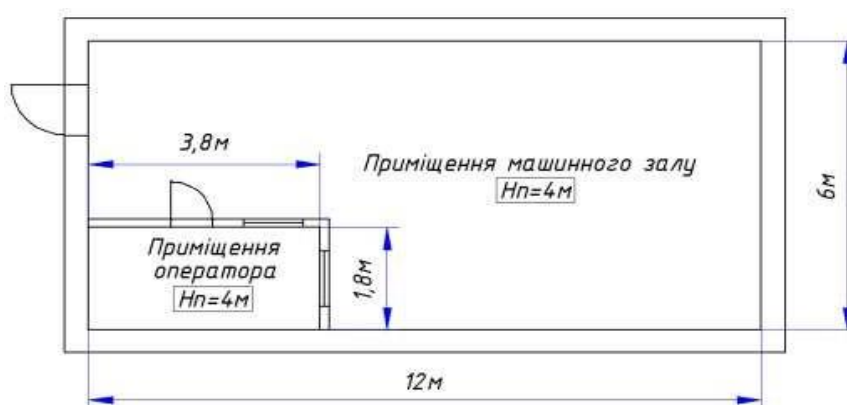


Рисунок 4.3 – План будівлі насосної станції

Як джерело штучного освітлення використовуємо трубчасті люмінесцентні лампи, оскільки в кімнаті відсутнє природне освітлення. Відповідно до умов експлуатації обираємо підвісний пиловологозахисний люмінесцентний світильник типу ПВЛМ-2х40, IP65 (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Світильник типу ПВЛМ-2х40

Світильник має наступні розміри: $a = 1325$ мм; $b = 148$ мм; $h = 160$ мм.

Згідно ДБН В.2.5-28:2018 «Природне та штучне освітлення» (таблиця 4.1) [17], виходячи із характеристики зорових робіт та мінімальних розмірів об'єкта визначаємо розряд зорової роботи як такі, що відносяться до розряду зорової роботи IV. Рівень нормованого загального освітлення (E_n), який потрібно забезпечити становить 200 лк, коефіцієнт запасу $K_z = 1,5$.

Для визначення загального світлового потоку, необхідного для досягнення необхідного рівня освітленості на робочій поверхні, враховуючи параметри приміщення і властивості його оздоблення, скористаємось методом коефіцієнта використання світлового потоку.

Визначимо необхідні коефіцієнти відбиття світла внутрішніми поверхнями будівлі:

- ρ_1 – коефіцієнт відбиття стелі, $\rho_1 = 70\%$;
- ρ_2 – коефіцієнт відбиття стін, $\rho_2 = 50\%$;
- ρ_3 – коефіцієнт відбиття підлоги, $\rho_3 = 30\%$.

Висота підвісу світильника (h_{cv}) становить 0,2 м.

Висота розташування робочої поверхні по відношенню до підлоги (h_p) становить 0,6 м.

Висота положення світильника над робочою поверхнею ($h_{сп}$) визначимо як різницю між висотою приміщення ($H_{п}$) та значеннями h_{cv} та h_p :

$$h_{сп} = H_{п} - h_{cv} - h_p = 4 - 0,2 - 0,6 = 3,2 \text{ м}$$

Розрахуємо необхідну кількість рядів світильників (N_p) у приміщенні по формулі:

$$N_p = \frac{B}{(H_{п} - h_p) \cdot \frac{L}{h}}$$

де B – ширина приміщення, м;

$H_{п}$ – висота приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні, м;

L/h – числове значення коефіцієнту світильника.

$$N_p = \frac{6}{(4 - 0,6) \cdot 1,3} = \frac{6}{4,42} = 1,36 \approx 2$$

Максимально допустиму відстань між світильниками визначимо за формулою:

$$L_{\max} = \frac{B}{N_p}$$

де B – ширина приміщення, м;

N_p – кількість рядів світильників у приміщенні, шт.

$$L_{\max} = \frac{6}{2} = 3 \text{ м}$$

Визначимо умовну загальну кількість світильників у приміщенні за формулою:

$$N_c = \frac{A \cdot B}{L_{\max}^2}$$

де A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

$L_{\max}$ – максимально допустима відстань між світильниками, м.

$$N_c = \frac{12 \cdot 6}{3^2} = \frac{72}{9} = 8 \text{ шт}$$

Визначимо значення індексу приміщення i , що характеризує співвідношення розмірів освітлювального приміщення і висоти розміщення світильників за формулою:

$$i = \frac{A \cdot B}{h_{\text{сп}}(A + B)}$$

де A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

$h_{\text{сп}}$ – висота підвісу світильника над робочою поверхнею, м.

$$i = \frac{12 \cdot 6}{3,2(12 + 6)} = 1,25$$

Визначимо значення коефіцієнта використання світлового потоку η , створюваного світильниками вибраного типу, який вибирається в залежності від виду джерела світла, типу обраного світильника, коефіцієнтів відбиття поверхонь приміщення та індексу приміщення згідно таблиці Е1 [17].

Отримаємо значення: $\eta = 47\%$.

Визначимо сумарний світловий потік системи освітлення приміщення за формулою:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot A \cdot B \cdot k_z \cdot z}{\eta}$$

де E_n – рівень нормованого загального освітлення, лк;

A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

k_z – коефіцієнт запасу ($k_z = 1,5$);

z – коефіцієнт нерівномірності (мінімальної) освітленості (відношення середньої освітленості до мінімальної) для люмінесцентних ламп дорівнює: $z = 1,1$;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{200 \cdot 12 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,47} = \frac{23760}{0,47} = 50553 \text{ лм}$$

Розрахуємо світловий потік умовного джерела світла $\Phi_{\text{л}}$ за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{\Phi_{\Sigma}}{N_c}$$

де Φ_{Σ} – сумарний світловий потік системи освітлення, лм;

N_c – умовна загальна кількість світильників у приміщенні, шт.

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{50553}{8} = 6319,15 \approx 6319 \text{ лм}$$

Вибираємо для світильника лампу ЛБ 40-2, яка має наступні технічні характеристики: $\Phi_{\text{лб40}} = 3000 \text{ лм}$, $P_{\text{л}} = 40 \text{ Вт}$.

Оскільки в кожному світильнику встановлюється по дві лампи, то світловий потік світильника становить:

$$\Phi_{\text{св}} = 2 \cdot \Phi_{\text{лб40}} = 2 \cdot 3000 = 6000 \text{ лм}$$

Знайдемо коефіцієнт m (співвідношення між розрахунковим світловим потоком умовної лампи $\Phi_{\text{л}}$ та фактичним світловим потоком світильника на базі двох вибраних стандартних ламп $\Phi_{\text{св}}$), який розраховується за формулою:

$$m = \frac{\Phi_{\text{л}}}{\Phi_{\text{св}}} = \frac{6319}{6000} = 1,053$$

Тобто різниця між значеннями становить 5,3%.

Визначимо загальну розрахункову освітленість (E_p), що створюється у приміщенні при застосуванні стандартних ламп за формулою:

$$E_p = \frac{\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} \cdot \eta}{A \cdot B \cdot k_3 \cdot z}$$

де $\Phi_{\text{л}}$ – фактичний світловий потік вибраної стандартної лампи, лм;

$N_{\text{л}}$ – фактична кількість ламп у приміщенні, шт;

η – коефіцієнт використання світлового потоку;

A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

k_3 – коефіцієнт запасу;

z – коефіцієнт нерівномірності (мінімальної) освітленості.

Звідси:

$$E_p = \frac{3000 \cdot 16 \cdot 0,47}{12 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = \frac{22560}{118,8} = 189,9 \text{ лк}$$

При правильному виборі типу і кількості стандартних ламп повинна виконуватись умова: $E_p = (-10\% \dots +20\%) \cdot E_n$, лк, де E_n – рівень нормованого загального освітлення, лк.

Визначимо різницю між значеннями E_p та E_n :

$$\Delta = \frac{E_p \cdot E_n}{E_n} \cdot 100\% = \frac{189,9 - 200}{200} \cdot 100\% = -5,3\%$$

Отриманий результат підтверджує правильність зроблених розрахунків.

План з розташуванням світильників згідно результатів проведених розрахунків для забезпечення світлового комфортного клімату в насосній станції приведений на рисунку 4.5.

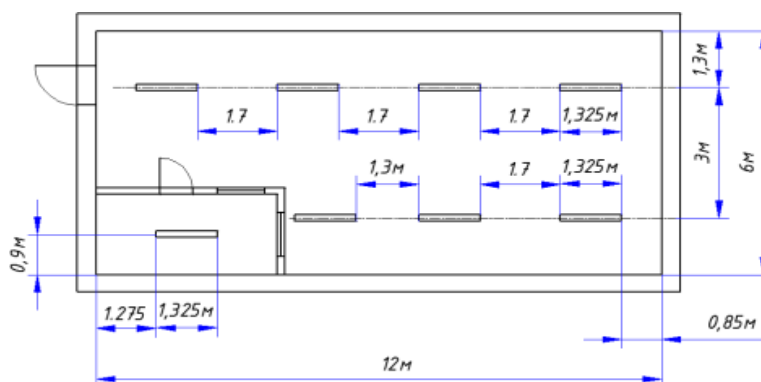


Рисунок 4.5 – План з розташуванням світильників згідно результатів проведених розрахунків

4.2 Заходи та рекомендації для забезпечення персоналу станції водопостачання у випадку надзвичайних ситуацій

Надзвичайна ситуація — це раптова подія, явище або специфічний стан, що несе пряму загрозу життю, здоров'ю, майну або навколишньому довкіллю людей, і вимагає негайного, скоординованого реагування для запобігання поширенню небезпеки або усунення її катастрофічних наслідків. Зазвичай надзвичайні ситуації класифікуються за характером їхнього походження (техногенні, природні, соціальні або воєнні), ступенем поширення, а також масштабом потенційних людських втрат і завданих матеріальних збитків. Оскільки насосна станція водопостачання є об'єктом критичної інфраструктури, забезпечення повної безпеки її персоналу у випадку виникнення будь-яких надзвичайних ситуацій є надзвичайно важливим завданням. Для досягнення цієї мети необхідно розробити та впровадити всеосяжний комплекс організаційних та технічних заходів, які охоплюють глибоке планування, регулярне навчання, а також впровадження відповідних протоколів, процедур та спеціалізованого обладнання.

Серед основних організаційних заходів, які є фундаментом для забезпечення персоналу станції, першочерговою є розробка деталізованого плану дій на випадок надзвичайної ситуації. Вона обов'язково включає всебічний аналіз ризиків для виявлення всіх потенційних загроз та об'єктивної оцінки їхнього можливого впливу на безперебійну роботу станції. На основі цього створюється надійний план евакуації, що передбачає розробку безпечних маршрутів для виходу з будівлі та призначення чітко визначених місць збору персоналу. Не менш важливим є план комунікації, який встановлює безперебійну процедуру оповіщення та інформування співробітників про характер небезпеки. Вирішальну роль у підготовці відіграє навчання та систематичне тренування працівників. Це передбачає організацію профільних навчальних семінарів, проведення практичних тренувань з евакуації для формування м'язової пам'яті, проведення регулярних інструктажів з техніки безпеки як для нових, так і для поточних працівників. Крім того, керівництво має забезпечити проходження

персоналом сертифікації у сфері надання першої невідкладної домедичної допомоги та правильного використання первинного протипожежного обладнання.

Окрім організаційної підготовки, життєво необхідним є стовідсоткове забезпечення всіх співробітників якісними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ). До них належать захисні каски, спеціальні захисні окуляри, маски, респіратори відповідного класу захисту, міцні рукавиці тощо. При цьому важлива не лише їхня наявність, а й суворий контроль стану: ЗІЗ необхідно регулярно перевіряти, обслуговувати та своєчасно оновлювати, щоб гарантувати їхню максимальну ефективність у критичний момент. Саму будівлю та територію насосної станції слід обладнати сучасними інженерними системами безпеки. Це включає встановлення чутливих систем раннього оповіщення про виникнення пожежі, витік небезпечних газів чи інші загрози; наявність надійних автономних джерел енергії, зокрема резервних дизельних генераторів, для забезпечення безперебійної роботи критично важливого обладнання у разі раптового відключення електроенергії; а також впровадження суворих систем контролю доступу, що унеможливляють несанкціоноване проникнення сторонніх осіб на територію стратегічного об'єкта. Додатковим рівнем захисту є налагодження тісної співпраці з місцевими екстреними та рятувальними службами: установлення прямих контактів та регулярне проведення спільних масштабних навчань з підрозділами пожежної охорони, медичними закладами та поліцією. Для підтримки всієї цієї системи в актуальному стані потрібен регулярний періодичний аудит безпеки та постійне оновлення планів дій і процедур відповідно до появи нових ризиків та змін у нормативно-правовій базі.

Для значного підвищення шансів персоналу насосної станції на виживання під час конкретних видів надзвичайних ситуацій розроблено деталізований перелік рекомендацій, які необхідно взяти за непорушну основу при складанні відповідних посадових інструкцій. Наприклад, у разі раптових обстрілів або збройного нападу, якщо небезпека застала вас на вулиці або відкритій території станції, слід негайно, не роздумуючи, лягти на землю. Озирнувшись довкола, потрібно швидко вибрати найближче надійне укриття — це може бути під'їзд,

підземний перехід, архітектурний виступ будівлі, масивний пам'ятник, міцний бетонний стовп, бордюр чи навіть глибока канава. Пробиратися до укриття слід виключно поповзом або пригинаючись, у жодному разі не піднімаючись на повний зріст. Опинившись у схованці, необхідно залишатися там до повного закінчення перестрілки. Якщо ж обстріл розпочався, коли ви знаходитесь всередині будівлі насосної станції, необхідно негайно переміститися в приміщення оператора, яке має розглядатися як найбільш захищене та безпечне місце через свою конструкцію. Там потрібно розташувати поруч із собою медичну аптечку та, за найпершої безпечної нагоди, сповістити головного диспетчера про своє точне місцеположення і стан здоров'я. У разі виявлення на території станції предмета, що за зовнішніми ознаками схожий на вибуховий пристрій, діють суворі правила: категорично забороняється його чіпати, підходити ближче або намагатися самотійно пересувати. Слід негайно припинити будь-які роботи поруч, утриматися від куріння, а також не використовувати мобільні телефони чи засоби радіозв'язку в безпосередній близькості, оскільки радіохвилі можуть спровокувати детонацію. Необхідно терміново повідомити про знахідку в правоохоронні органи, точно зафіксувавши час і місце виявлення підозрілого предмета. По можливості, слід забезпечити охорону небезпечної зони на безпечній відстані, дочекатися прибуття кваліфікованих вибухотехніків та правоохоронців, і чітко вказати їм місце розташування предмета, а також обставини, за яких його було знайдено.

У випадку виникнення небезпечних хімічних аварій з викидом токсичних речовин, час іде на секунди. Необхідно миттєво закрити всі вікна, відключити електроенергію, щоб уникнути іскріння, одягнути максимально закритий одяг та головний убір із щільної тканини, що зменшить площу контакту шкіри з отрутою. Після цього слід максимально швидко виходити із зони можливого хімічного зараження, рухаючись суворо перпендикулярно до напрямку вітру, щоб найшвидше покинути хмару небезпечної речовини. Для захисту вразливих органів дихання необхідно обов'язково використати штатний протигаз, промисловий респіратор, або, за їх відсутності, ватно-марлеву пов'язку чи будь-який шматок тканини, рясно змочений чистою водою. Якщо обставини

складаються так, що покинути зону зараження неможливо, потрібно залишитись у приміщенні і здійснити його максимальну герметизацію: щільно закрити вікна, двері та всі вентиляційні отвори, а всі наявні щілини ретельно заклеїти папером, вологою тканиною або скотчем. Після вжиття цих заходів треба обов'язково сповістити диспетчера про своє місцеположення. При радіаційній загрозі алгоритм дій дещо відрізняється: перебуваючи на вулиці, слід миттєво захистити органи дихання хусткою, шарфом або частиною свого одягу і якомога швидше сховатися в капітальному приміщенні. Опинившись усередині, потрібно відразу закрити та загерметизувати всі вікна, двері й вентиляційні отвори. Необхідно зробити аварійний запас питної води в закритих ємностях, сповістити диспетчера водоканалу про своє місцезнаходження і стан, та обов'язково увімкнути радіоприймач для отримання актуальної інформації про масштаби аварії та офіційних вказівок місцевої влади щодо подальших дій. Засоби захисту дихання в цьому випадку використовуються ті самі, що й за хімічної аварії, або застосовуються спеціальні штатні засоби протирадіаційного захисту, якими має бути укомплектована станція.

Природні катаклізми також вимагають швидкого реагування. Під час раптового урагану чи шквального вітру, якщо стихія застала вас усередині будівлі станції, необхідно негайно відійти від вікон та зовнішніх дверей, оскільки скло може розбитися і завдати важких травм. Найкраще зайняти безпечне місце біля капітальних стін внутрішніх приміщень і превентивно вимкнути електроенергію. Якщо ураган застав вас на вулиці, життєво важливо триматися якнайдалі від будь-яких легких чи тимчасових будівель, мостів, естакад, ліній електропередач, високих щогл, дерев, а також річок, озер та великих промислових об'єктів. Для захисту від уламків конструкцій та шматків розбитого скла, які летять з величезною швидкістю, використовуйте листи фанери, міцні картонні та пластмасові ящики, дошки та будь-які інші масивні підручні засоби. Намагайтеся якнайшвидше сховатися в надійних кам'яних будинках, підвалах, глибоких льохах, спеціальних укриттях або інших заглиблених приміщеннях. Категорично забороняється заходити у вже пошкоджені та старі будівлі, оскільки вони можуть раптово обрушитися під час

нових, ще сильніших поривів вітру. У випадку пилової бурі алгоритм дій передбачає негайне укриття в будівлі з обов'язковим захистом обличчя марлевою пов'язкою, хусткою чи шматком тканини, а очей — щільними окулярами. Якщо ж сховатися в будівлі неможливо і буря застає вас на відкритій місцевості, необхідно знайти заглиблення рельєфу: ховайтесь на дні дорожнього кювету, у природних ямах, ровах чи вузьких ярах, максимально щільно притискаючись до землі та ретельно закривши голову одягом або гілками дерев. Ні в якому разі не залишайтеся в автомобілі, оскільки його може перекинути або засипати; швидко виходьте з нього та шукайте укриття нижче рівня землі. У випадку сильного землетрусу, якщо ви перебуваєте всередині будівлі станції і поблизу немає надійного і швидкодоступного укриття надворі, залишайтеся всередині. Негайно заховайтесь під міцний стіл або інший масивний меблевий предмет, який здатний прийняти на себе удар і захистити вас від падаючих уламків стелі чи світильників. Якщо поруч немає відповідних меблів, станьте впритул біля несучої внутрішньої стіни або в дверному отворі капітальної стіни, якомога далі від вікон, дзеркал, шаф та інших важких предметів, які можуть легко впасти. Обов'язково закрийте голову та шию руками або будь-якими доступними міцними предметами. Якщо під час поштовхів ви перебуваєте на відкритій території станції, залишайтеся на відкритому просторі; відійдіть на безпечну відстань від будівель, високих дерев, ліній електропередач та інших об'єктів інфраструктури, які можуть обвалитися, після чого лягайте на землю, так само прикриваючи голову і шию руками. За будь-якої з перелічених погодних чи сейсмічних небезпек, за першої ж можливості необхідно зв'язатися з диспетчером для інформування про свій стан.

Нарешті, найбільш поширеною загрозою є пожежа. У випадку навіть найменшого загоряння необхідно негайно, без зволікань, повідомити головного диспетчера та викликати професійну пожежну службу за екстреними номерами "101" або "112", чітко вказавши адресу та характер пожежі. Відразу після цього починайте евакуацію з приміщення насосної станції, суворо дотримуючись затвердженого плану евакуації та користуючись визначеними безпечними маршрутами. Якщо пожежа знаходиться на початковій стадії, має незначні

масштаби, і ви особисто пройшли відповідне практичне навчання з пожежної безпеки, ви можете спробувати самотійно загасити її, використовуючи наявні первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники відповідного типу або внутрішні пожежні шланги). Проте ніколи не ризикуйте власним життям: якщо ви бачите, що вогонь швидко поширюється, або пожежа виходить з-під вашого контролю, негайно кидайте спроби гасіння, залишайте приміщення і на безпечній відстані дочекайтеся прибуття підрозділів пожежної служби. Під час евакуації за всяку ціну уникайте сильно задимлених зон, оскільки отруєння чадним газом настає вкрай швидко і непомітно. Якщо ж вам неможливо уникнути проходження через дим, обов'язково використовуйте вологу тканину для щільного прикриття рота і носа, що діятиме як найпростіший фільтр. Пам'ятаючи, що гарячий дим та токсичні гази завжди піднімаються вгору і скупчуються під стелею, переміщуйтеся до рятувального виходу в максимально нахиленому положенні, або, у разі сильного задимлення, пересувайтеся поповзом по самій підлозі, де залишається прошарок чистого повітря, щоб мінімізувати ризик смертельного вдихання диму.

Висновки до розділу №4

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи було проведено комплексний аналіз питань охорони праці та безпеки життєдіяльності у виробничих приміщеннях діючої насосної станції водопостачання комерційного підприємства. Під час обстеження стану машинного залу та приміщення оператора було ідентифіковано ряд небезпечних факторів для працівників. Серед них виділено можливість ураження електричним струмом через порушення ізоляції, відсутність гумових килимків або підтоплення, а також ризик травмування через водопровідні труби та відкриті оглядові люки. Крім того, негативний вплив на персонал чинять постійний виробничий шум від агрегатів, недостатнє штучне освітлення та некомфортний мікроклімат через малоефективні обігрівачі і відсутність кондиціонера.

Оскільки якісне освітлення є критично важливим для безпеки, ефективності роботи та здоров'я працівників, було виконано детальний світлотехнічний

розрахунок. Для забезпечення нормативного рівня освітлення у 200 лк обрано підвісні пиловологозахищені люмінесцентні світильники типу ПВЛМ-2х40 з лампами ЛБ 40-2. Розрахунки довели необхідність встановлення восьми таких світильників, після чого було розроблено відповідний план їх оптимального розташування у приміщенні.

Для забезпечення безпеки персоналу розроблено комплекс організаційних заходів, який включає створення планів евакуації та комунікації, проведення регулярних тренувань і інструктажів, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, а також обладнання станції системами оповіщення та автономними джерелами енергії. Додатково сформовано детальний перелік вказівок щодо дій у конкретних надзвичайних ситуаціях, таких як збройні обстріли, виявлення вибухових пристроїв, хімічні та радіаційні загрози, пожежі або стихійні лиха. Підсумовуючи, впровадження розрахованої системи освітлення, усунення виявлених небезпечних факторів та суворе дотримання розроблених інструкцій цивільного захисту дозволить мінімізувати виробничі ризики і гарантувати збереження здоров'я персоналу насосної станції.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У результаті виконання кваліфікаційної роботи вирішено актуальне науково-технічне завдання щодо підвищення надійності, енергоефективності та рівня безпеки функціонування діючої насосної станції першого підйому. Досягнення мети було забезпечено шляхом глибокої модернізації існуючих технологічних схем та розробки комплексної системи автоматизованого керування (САК) на базі передових мікропроцесорних засобів.

В ході дослідження було виконано детальний аудит технічного стану об'єкта, який виявив критичну неефективність застосовуваного методу прямого дроселювання потоку води та значну моральну застарілість наявної контрольно-вимірювальної апаратури. На основі аналізу існуючих технологій (зокрема алгоритмів оптимізації специфічного споживання енергії SEC) та технічних вимог підприємства-замовника було обґрунтовано безальтернативну необхідність переходу на індивідуальне частотне регулювання роботи відцентрових насосних агрегатів. Для практичної реалізації цього рішення спроектовано розгорнуту апаратно-програмну архітектуру САК. Її інтелектуальним ядром став сучасний програмований логічний контролер (ПЛК), що керує векторними частотними перетворювачами, забезпечує локальну візуалізацію через НМІ-панель та підтримує надійний телемеханічний радіозв'язок із центральним диспетчером.

Окрім власне управління водопостачанням, до структури САК були інтегровані життєво необхідні підсистеми моніторингу безпеки. Оновлена гідравлічна обв'язка отримала прецизійні аналогові датчики тиску та інноваційний зворотний клапан (спроектований у САПР) з можливістю електронного контролю положення заслінки. В рамках розробки також створено імітаційну математичну модель насосного комплексу в середовищі Matlab/Simulink для підтвердження адекватності обраних алгоритмів керування. Окрему увагу було приділено питанням охорони праці: виконано світлотехнічний розрахунок для забезпечення нормативних умов у приміщенні та розроблено деталізовані інструкції з безпеки життєдіяльності персоналу в

умовах різних надзвичайних ситуацій. Впровадження розробленого проекту гарантуватиме стабілізацію тиску в мережі, суттєве зниження питомих енерговитрат та надійний захист обладнання і працівників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Автоматизація технологічних процесів і систем управління / [Андрєєв В.І., Кузьменко А.О., Петренко О.В.]: Підручник. — Київ: 2018. — 312 с.
- 2) Енергоощадні технології в теплоенергетиці / [Коваленко О.М., Савченко В.В., Лисенко І.П.]: Навчальний посібник. — Харків: 2019. — 245 с.
- 3) Системи автоматичного керування електроприводами насосних установок / [Поліщук В.В., Ткачук О.І.]: Монографія. — Львів: 2020. — 288 с.
- 4) Оптимізація режимів роботи насосного обладнання котелень / [Мельник О.С., Бойко І.В., Гаврилюк В.М.]: Підручник. — Одеса: 2017. — 215 с.
- 5) Автоматизація систем теплопостачання та котельних установок / [Сидоренко В.М., Кравченко О.П.]: Навчальний посібник. — Дніпро: 2021. — 305 с.
- 6) Енергоефективність комунальної теплоенергетики / [Григоренко О.В., Лисенко О.М., Марченко В.І.]: Монографія. — Київ: 2016. — 198 с.
- 7) Частотно-регульований електропривод у системах водопостачання / [Захаров В.О., Романюк А.С.]: Практичний посібник. — Харків: 2019. — 175 с.
- 8) Мікропроцесорні системи управління в промисловості / [Іванов С.В., Павленко В.М., Руденко О.С.]: Підручник. — Київ: 2020. — 340 с.
- 9) Автоматизовані системи моніторингу та управління (SCADA) / [Шевченко О.І., Костюк В.В.]: Навчальний посібник. — Львів: 2018. — 260 с.
- 10) Насоси, вентилятори та димососи теплових станцій / [Ткаченко В.А., Мороз О.В., Петренко О.М.]: Підручник. — Харків: 2015. — 410 с.
- 11) Теплотехніка та теплоенергетичне обладнання / [Козаченко О.М., Руденко В.І.]: Підручник. — Одеса: 2019. — 355 с.
- 12) Датчики та первинні перетворювачі в системах автоматизації / [Гончарук В.О., Левченко О.С., Бойко В.В.]: Навчально-методичний посібник. — Київ: 2021. — 180 с.
- 13) Проектування систем автоматизації технологічних процесів / [Бондаренко В.І., Марченко О.В.]: Підручник. — Дніпро: 2017. — 290 с.
- 14) Енергозбереження в системах теплопостачання та вентиляції / [Степаненко О.В., Ковальчук В.М., Сидорчук О.І.]: Монографія. — Київ: 2022. — 220 с.

- 15) Програмовані логічні контролери в системах управління / [Тарасов О.М., Гриценко В.І.]: Навчальний посібник. — Харків: 2020. — 315 с.
- 16) Експлуатація та обслуговування твердопаливних котельних установок / [Пономаренко В.В., Савченко О.І.]: Довідник. — Львів: 2018. — 275 с.
- 17) Теорія автоматичного керування технічними системами / [Кравчук О.С., Медведєв М.Г., Романенко І.Г.]: Підручник. — Київ: 2019. — 450 с.
- 18) Системи диспетчеризації інженерного обладнання будівель / [Лисенко В.О., Коваль О.М.]: Навчальний посібник. — Одеса: 2021. — 190 с.
- 19) Векторне керування асинхронними двигунами / [Романенко В.І., Сидорчук О.В., Кравченко В.О.]: Монографія. — Дніпро: 2016. — 210 с.
- 20) Промислові мережі та інтерфейси передачі даних в АСУ ТП / [Бойченко О.В., Гаврилюк В.М.]: Навчальний посібник. — Харків: 2020. — 235 с.
- 21) Підвищення ефективності роботи відцентрових насосів / [Кравченко В.О., Петренко В.І., Шевченко О.С.]: Монографія. — Київ: 2018. — 185 с.
- 22) Охорона праці в теплоенергетиці та електроустановках / [Козаченко В.В., Мартинюк О.С.]: Підручник. — Львів: 2019. — 250 с.
- 23) Основи метрології та промислових вимірювань / [Шевченко В.І., Григоренко О.М., Бойко О.В.]: Навчальний посібник. — Одеса: 2017. — 310 с.
- 24) Автоматизація теплових пунктів та вузлів керування / [Бондар О.В., Ткачук В.М.]: Практичний посібник. — Київ: 2021. — 160 с.
- 25) Інтелектуальні системи управління в теплоенергетиці / [Павленко О.С., Руденко О.В., Левченко В.І.]: Монографія. — Харків: 2022. — 280 с.
- 26) Керівництво з експлуатації: Перетворювач частоти векторний ПЧВ204 / [Колектив авторів ТОВ «ОВЕН»]: Технічна документація. — Київ: 2020. — 124 с.
- 27) Керівництво з програмування: Програмоване реле ПР200 / [Колектив авторів ТОВ «ОВЕН»]: Технічний посібник. — Київ: 2019. — 98 с.
- 28) Сенсорні панелі оператора СПЗхх: Настанова з конфігурування / [Колектив авторів ТОВ «ОВЕН»]: Довідник. — Харків: 2021. — 112 с.
- 29) Теплові мережі, системи теплопостачання та теплоаккумулятори / [Коваленко В.І., Савчук О.М., Гриценко О.С.]: Підручник. — Дніпро: 2016. — 345 с.

- 30) Моделювання технологічних процесів у теплоенергетиці / [Марченко В.О., Гриценко О.С.]: Навчальний посібник. — Львів: 2020. — 215 с.
- 31) Безпека експлуатації електроустановок споживачів / [Тарасенко В.В., Ковальчук О.І., Петренко О.В.]: Підручник. — Київ: 2018. — 320 с.
- 32) Сучасна номенклатура промислових датчиків температури та тиску / [Бойко О.В., Петренко О.М.]: Довідковий посібник. — Одеса: 2022. — 145 с.
- 33) Енергоменеджмент та енергоаудит на промислових підприємствах / [Сидоренко О.В., Романюк В.І., Бондаренко О.М.]: Монографія. — Харків: 2019. — 270 с.
- 34) Засоби людино-машинної візуалізації в АСУ ТП / [Кравченко О.С., Шевченко В.М.]: Навчальний посібник. — Дніпро: 2021. — 188 с.
- 35) Енергетичний аудит та модернізація котельних установок / [Левченко В.І., Гаврилюк О.В., Козаченко О.М.]: Практичний посібник. — Київ: 2017. — 150 с.
- 36) Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж / [Міністерство енергетики та вугільної промисловості України]: Нормативний документ. — Київ: 2020. — 135 с.
- 37) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98) / [Державний комітет України по нагляду за охороною праці]: Офіційне видання. — Київ: 1998. — 220 с.
- 38) Технічні засоби автоматизації: датчики, контролери, виконавчі механізми / [Бондаренко О.М., Ткаченко В.В., Савченко О.І.]: Підручник. — Львів: 2019. — 380 с.
- 39) Надійність систем автоматизації та промислового управління / [Козаченко О.В., Мартинюк В.І.]: Монографія. — Харків: 2021. — 205 с.
- 40) Алгоритми погодного регулювання в системах теплопостачання / [Павленко В.В., Руденко О.С., Ткачук В.М.]: Навчальний посібник. — Одеса: 2022. — 165 с.