

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ
Енергетики, автоматики і
енергозбереження
_____ Каплун В.В.
«__» _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І. І. Мартиненка
_____ Опришко О.О.
«__» _____ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА
РОБОТА**

**на тему «Розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи
керування станцією водопостачання з використанням КТЗ Schneider Electric»**

Спеціальність 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., доц. _____ Іващук В.В.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доц. _____ Дудник А. О.
науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав

_____ Євтушенко М.П.
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження

ЗАТВЕРДЖУЮ

**В.о. завідувача кафедри автоматики
та робототехнічних
систем ім. акад. І. І. Мартиненка**

_____ О. О. Опришко
«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

Євтушенку Максиму Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(код і назва)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування станцією водопостачання з використанням КТЗ Schneider Electric

затверджена наказом ректора НУБіП України від "13" грудня 2023 р. № 2263 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.05.30.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: Завдання кафедри на виконання магістерської кваліфікаційної роботи. Наукова література та публікації, що відповідають тематиці магістерської кваліфікаційної роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз технологічного процесу станції водопостачання.
2. Дослідження станції водопостачання як об'єкта автоматизації.
3. Вибір регулятора та обґрунтування його параметрів.
4. Дослідження автоматичної системи керування станцією водопостачання .
5. Схеми системи автоматизації.
6. Техніко-економічне обґрунтування.

Дата видачі завдання "26" вересня 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Дудник А.О.

Завдання прийняв до виконання _____ Євтушенко М.П.

Анотація

В рамках магістерської кваліфікаційної роботи був проведений аналіз виробничих процесів на станції водопостачання, а також оцінений стан існуючих систем автоматизації. Результатом роботи стало розроблення системи автоматичного керування станцією водопостачання. Також був проведений загальний опис технологічного процесу та здійснений розрахунок і вибір технологічного обладнання та засобів автоматизації.

Прийняті рішення та розроблені системи були обґрунтовані на основі проведених розрахунків, де було продемонстровано ефективність використання системи автоматичного керування. Крім того, була досліджена економічна доцільність використання такої системи.

Annotation

As part of his master's thesis, he analyzed the production processes at a water supply station and assessed the state of existing automation systems. The result of the work was the development of an automatic control system for the water supply station. A general description of the technological process was also carried out, as well as the calculation and selection of technological equipment and automation tools.

The decisions made and the systems developed were substantiated on the basis of the calculations performed, where the efficiency of the automatic control system was demonstrated. In addition, the economic feasibility of using such a system was investigated

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТАНЦІЄЮ ВОДОПОСТАЧАННЯ	8
1.1. Аналіз розвитку систем автоматичного керування станціями водопостачання.....	11
1.2. Технологічна схема станції водопостачання	14
1.3. Опис існуючих методів керування станціями водопостачання	16
1.3.1. Керування насосу з використанням дроселювання	17
1.3.2. Керування насосу за допомогою рециркуляції (байпасування).....	18
1.3.3. Керування насосу за допомогою зміни частоти обертання вала насосного агрегату	20
1.3.4. Керування насосу за допомогою гідромурфи	21
1.4. Розробка функціональної схеми станції водопостачання	22
РОЗДІЛ 2. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ	23
2.1. Аналіз та вибір алгоритму керування станцією водопостачання	23
2.2. Побудова загальної схеми САК	29
2.3. Алгоритм програми для керування насосною станцією	30
РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА SCADA	33
3.1 Математична модель відцентрованого насосу	33
3.2 Математична модель асинхронного двигуна	37
3.3 SCADA система для станції водопостачання.....	40
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	42
4.1 Вибір та опис обладнання для реалізації САК	42
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТАНЦІЄЮ ВОДОПОСТАЧАННЯ	52
ВИСНОВКИ	56

ВСТУП

Системи автоматизованого керування (САК) відіграють важливу роль у забезпеченні стабільного функціонування станцій водопостачання, що є критично необхідним як для комунальних, так і для промислових підприємств. Надійне постачання води є ключовим фактором для житлової, комерційної та виробничої інфраструктури, а ефективне регулювання параметрів роботи насосних станцій, таких як контроль тиску, витрати води та енергоспоживання, суттєво впливає на продуктивність і загальну ефективність системи.

Актуальність автоматизації водопостачання

Зі зростанням вимог до енергозбереження та ефективного використання ресурсів автоматизація станцій водопостачання стає невід'ємною частиною сучасного управління інженерними системами. Завдяки впровадженню автоматизованих методів керування можна не лише забезпечити стабільний рівень водопостачання, але й оптимізувати процеси регулювання, мінімізуючи втрати енергії та ресурсів.

Для досягнення високої ефективності та надійності роботи насосних станцій необхідні вдосконалені методи керування, які дозволяють оперативно реагувати на зміну експлуатаційних умов, оптимізувати параметри роботи насосних агрегатів та забезпечувати інтеграцію з сучасними технологіями моніторингу.

Мета та завдання дослідження

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка надійної та ефективної комп'ютерно-інтегрованої системи керування насосною станцією з використанням технологій Schneider Electric.

Основні завдання дослідження включають:

- Аналіз існуючих технологічних процесів водопостачання та оцінку сучасних методів автоматизації;
- Розробку алгоритмів керування насосними агрегатами з урахуванням їх технічних характеристик;

- Вибір відповідного апаратного забезпечення, що відповідає вимогам енергоефективності та надійності;
- Математичне моделювання роботи системи для оцінки її ефективності та впливу на загальну продуктивність станції;
- Дослідження економічної доцільності впровадження запропонованого рішення з точки зору витрат на обладнання та експлуатацію;
- Визначення перспектив розвитку системи та її інтеграції з сучасними засобами моніторингу та аналізу даних.

Переваги та перспективи запропонованої автоматизованої системи

Запропонована система керування насосною станцією має значний потенціал для подальшого вдосконалення та розширення її функціональних можливостей.

Серед основних переваг використання технологій Schneider Electric у системах автоматизації водопостачання можна виділити:

- Підвищену точність контролю параметрів водопостачання – точне регулювання тиску та витрати води забезпечує стабільність роботи насосного обладнання;
- Оперативне реагування на зміну умов експлуатації – система здатна швидко адаптуватися до змін у технологічних процесах, що підвищує її гнучкість і ефективність;
- Зниження ризику людських помилок – автоматичне керування дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та зменшити ймовірність помилкових дій операторів;
- Оптимізацію енергоспоживання – застосування частотного регулювання двигунів насосних агрегатів дозволяє знизити витрати електроенергії та покращити загальну продуктивність системи.

Крім того, система керування може бути інтегрована з сучасними технологіями моніторингу та аналізу даних, що дозволить покращити контроль

за роботою насосної станції та забезпечити її оптимальне функціонування з мінімальними витратами ресурсів.

Таким чином, розробка та впровадження автоматизованої системи керування насосною станцією з використанням технологій Schneider Electric дозволить суттєво підвищити ефективність та надійність водопостачання, зменшити витрати на експлуатацію та забезпечити максимальну продуктивність насосного обладнання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТАНЦІЄЮ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Насосні станції являють собою комплекс електрогідравлічних споруд і обладнання, що забезпечують перетворення електричної енергії в механічну для переміщення рідин, а також організують процес їх керування. Завдяки інтеграції високотехнологічних засобів управління та сучасних технічних рішень, ці установки грають ключову роль у забезпеченні ефективності водопостачання, каналізації та дренажних систем.

Класифікація насосних станцій є багатовимірною та залежить від низки факторів, таких як сфера застосування, конструктивні особливості, технологічні вимоги і умови монтажу. За призначенням вони можуть бути розділені на:

1. Водопровідні насосні станції – призначені для перекачування холодної або гарячої чистої води;
2. Каналізаційні насосні станції – використовуються для перекачування стоків до очисних споруд;
3. Дренажні насосні станції – забезпечують видалення надлишкової рідини з ґрунту.

В залежності від розташування в системі водопостачання та призначення, насосні станції поділяють на:

1. Станції першого підйому, які переносять воду з джерела до очисних споруд або безпосередньо в мережу/резервуари споживача;
2. Станції другого підйому, що використовуються для транспортування очищеної води з резервуарів до водопровідної мережі;
3. Циркуляційні станції, які застосовуються на підприємствах і теплових електростанціях для забезпечення циркуляції рідини;
4. Підвищувальні (станції підкачки), які використовуються для збільшення напору на окремих ділянках мережі, зокрема в багатоповерхових будинках, де вони компенсують негативні коливання тиску, що виникають у години піку споживання.

За критерієм надійності насосні станції розподіляють на такі категорії:

1. Перша категорія – вимога до безперервної роботи без перерв, що характерно для спеціальних виробництв, господарських або пожежних систем;
2. Друга категорія – допускаються короткострокові перерви для переходу на резервне обладнання;
3. Третя категорія – можливі зупинки подачі води у разі аварійної зупинки, але не більше одного дня.

За умовами облаштування насосні станції можуть бути:

1. Наземними;
2. Напівзаглибленими (глибиною 3–4 м);
3. Заглибленими або шахтними (близько 8 м).

Крім того, варто відзначити, що системи управління насосними станціями можуть мати різні режими:

1. Ручне керування, коли оператори безпосередньо контролюють запуск та роботу агрегатів;
2. Автоматичне керування, засноване на даних від датчиків рівня, тиску та споживання води;
3. Напівавтоматичне керування, при якому оператор задає початкові параметри, а система забезпечує подальшу роботу;
4. Дистанційне керування, яке здійснюється із диспетчерської служби, що знаходиться поза межами самої насосної станції.

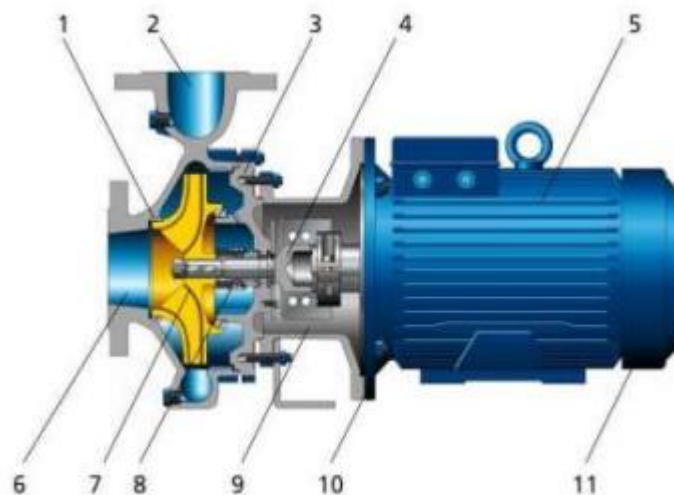
При проектуванні обирається відповідний метод керування в залежності від результатів обстеження станції, її конструктивних особливостей та вимог технічного завдання. Також, насосні станції класифікують за характером основного обладнання:

1. Станції з осьовими й діагональними горизонтальними або вертикальними насосами;
2. Станції з об'ємними насосами;
3. Станції з різного роду водопідіймачами;

4. Станції з відцентровими горизонтальними або вертикальними насосами.

Найбільшу популярність у сучасному проектуванні набули відцентрові насоси завдяки низькій вартості виробництва на одиницю напору або продуктивності, високому коефіцієнту корисної дії, надійності, широким можливостям конфігурації та простоті експлуатації. Серед інших переваг — невелика зміна напору в робочому діапазоні при зміні подачі, зручність паралельного та послідовного з'єднання насосів, що дозволяє масштабувати роботу системи за потреби.

Конструкція відцентрового насоса зображена на рисунку 1.1 та включає такі основні елементи: дроселюючий зазор, нагнітаючий патрубок, робочу камеру, вал двигуна, корпус двигуна, всмоктуючий патрубок, робоче колесо, гідравлічний ущільнювач, піддон приводу, монтажний фланець та захисний кожух.



Принцип роботи відцентрового насоса базується на наступних етапах:

1. Всередині робочої камери обертається робоче колесо, лопаті якого захоплюють рідину, спричиняючи її переміщення.
2. Обертання робочого колеса створює відцентрову силу, що штовхає рідину до стін камери, підвищуючи тиск у зоні нагнітання, завдяки чому рідина виштовхується через напірний патрубок.

3. У центрі камери формується зона з нижчим тиском, що стимулює всмоктування свіжої рідини через всмоктуючий патрубок для забезпечення безперервного циклу роботи.

Таким чином, класифікація та організація насосних станцій базуються на їхньому призначенні, конструктивних особливостях та умовах експлуатації, що дозволяє обрати оптимальні технічні та управлінські рішення для забезпечення надійної роботи систем водопостачання та аналогічних інженерних комплексів.

1.1. Аналіз розвитку систем автоматичного керування станціями водопостачання

Аналіз сучасних тенденцій розвитку автоматизованих систем у сфері водопостачання підтверджує важливість оптимізації енергоспоживання та вдосконалення методів керування насосними станціями. Основним споживачем електроенергії в таких системах є насосні агрегати, що обумовлює необхідність розробки рішень, спрямованих на підвищення їх ефективності.

Попри те, що провідні компанії та розробники автоматизованих систем впроваджують власні підходи до оптимізації роботи насосного обладнання, рівень автоматизації вітчизняних водопровідних мереж залишається недостатнім. Це є суттєвим бар'єром на шляху впровадження сучасних енергоощадних технологій, які здатні знизити витрати електроенергії та підвищити ефективність роботи інфраструктури.

Основні напрями розвитку автоматизації водопостачання

У сфері автоматизації насосних станцій можна виділити два ключові напрями:

Вдосконалення диспетчерського керування абонентськими мережами – моніторинг споживання води та впровадження розумних систем розподілу ресурсів.

Модернізація систем управління насосними агрегатами – запровадження технологій інтелектуального керування, що дозволяють зменшити перевитрати енергії та оптимізувати режими роботи станцій.

Хоча універсального методу створення енергоефективних систем автоматизації поки що не існує, очевидно залишається необхідність інтегрованого підходу. Такий підхід передбачає використання сучасних обчислювальних технологій, алгоритмів прогнозування та автоматизованих методів регулювання процесів водопостачання.

Енергоефективність як фактор розвитку водопостачальних систем

Насосні станції другого підйому становлять значну частину загальних експлуатаційних витрат у водопостачальних мережах. Динамічні зміни рівня водоспоживання протягом доби, тижня чи сезону спричиняють значні відхилення режимів роботи насосів від оптимальних параметрів. Це потребує своєчасної корекції параметрів подачі води для уникнення нераціонального використання електроенергії.

Традиційні способи регулювання продуктивності насосів, такі як дроселювання трубопроводів або зміна кількості працюючих агрегатів, часто не враховують вимоги до енергоефективності. Саме тому сучасний підхід до автоматизації водопостачання повинен ґрунтуватися на застосуванні інтелектуальних алгоритмів керування.

Вплив регульованих електроприводів на зменшення енергоспоживання

Одним із ключових рішень для зниження енергоспоживання у водопостачальних системах є використання насосів із регульованими електроприводами. Від наявності таких електроприводів залежить:

- Рівень автоматизації – можливість гнучкого керування робочими параметрами насосної станції.
- Ефективність алгоритмів регулювання – адаптація системи до змін водоспоживання без перевитрат енергії.
- Оптимізація витрат електроенергії – зменшення втрат, спричинених неефективними способами регулювання подачі води.

Використання інтелектуального управління насосами дозволяє підтримувати стабільний рівень водопостачання при мінімальних енергетичних витратах. Завдяки таким рішенням водопровідні мережі можуть значно підвищити свою продуктивність, зменшити операційні витрати та продовжити термін служби обладнання.

Роль сучасних інформаційних технологій у розвитку водопостачання

На сьогодні автоматизовані системи керування насосними станціями оснащені широким спектром сенсорів та засобів моніторингу технологічних параметрів. Це створює сприятливі умови для інтеграції енергоощадних рішень та оптимізації процесів водопостачання.

Ключовими аспектами використання інформаційних технологій у насосних станціях є:

- Збір та аналіз даних у реальному часі – можливість прогнозування змін водоспоживання та коригування роботи насосів;
- Інтелектуальні системи моніторингу – контроль параметрів насосного обладнання та оперативне реагування на відхилення від оптимальних значень;
- Автоматизоване регулювання технологічних процесів – підтримка ефективної роботи системи без постійного втручання персоналу.

Висновки та перспективи розвитку

Оптимізація енергоспоживання у водопостачальних системах можлива завдяки впровадженню сучасних підходів до автоматизації управління та активному використанню інформаційних технологій.

Розробка та застосування інтелектуальних методів регулювання насосними станціями сприятиме зниженню витрат електроенергії, підвищенню ефективності роботи обладнання та покращенню загальної продуктивності водопостачальних мереж.

Таким чином, комплексний підхід до автоматизації насосних станцій є ключовим напрямом розвитку систем водопостачання. Інтеграція сучасних

технологій, застосування алгоритмів адаптивного регулювання та використання інноваційних інформаційних платформ дозволить досягти значного підвищення ефективності та енергозбереження у галузі.

1.2. Технологічна схема станції водопостачання

Основним робочим елементом насосної станції є насосна установка, до складу якої входять один або кілька насосів, що забезпечують подачу води та її відведення через систему трубопроводів. Крім насосів, до складу установки входять запірні арматури, приводний двигун та вимірювальні пристрої для контролю технологічних параметрів.

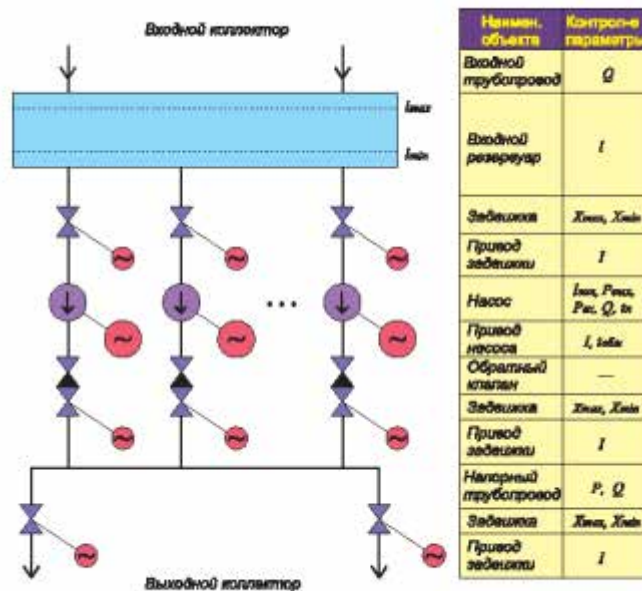


Рисунок 1.1 – Технологічна схема станції водопостачання

На насосних станціях у якості приводних механізмів застосовуються об'ємні та динамічні насоси.

Об'ємні насоси працюють за принципом витіснення: тиск рідини підвищується внаслідок її стиснення. До таких пристроїв належать поршневі (діафрагмові та поршневі) і роторні (аксіально- і радіально-поршневі, пластинчасті, шестерні, гвинтові тощо) насоси.

Динамічні насоси функціонують за принципом передачі енергії рухомій рідині. До них відносяться лопатеві (відцентрові, осьові) та фрикційні (вихрові,

дискові, реактивні) нагнітачі. Найбільш поширеними серед них є відцентрові насоси.

Конструкцію відцентрового насоса показано на рисунку 1.2. Його корпус (1) має спіральну форму. Усередині розташований вал (2), на якому закріплено робоче колесо (3). Воно складається з двох дисків—заднього і переднього, між якими розміщені лопаті (4), спрямовані у протилежний бік від напрямку обертання колеса. Корпус за допомогою штуцерів (5) і (6) з'єднується із всмоктувальним та напірним трубопроводами.

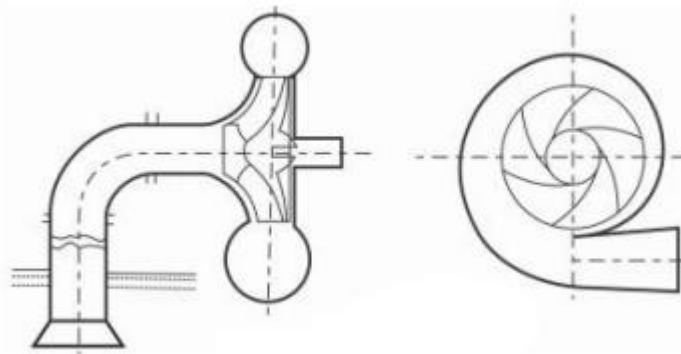


Рисунок 1.2 – Зображення відцентрованого насосу

При обертанні робочого колеса у корпусі насоса, заповненому рідиною, та поглинальній трубі, рідина, що знаходиться між лопатями крильчатки, переміщується до периферійної зони під дією відцентрової сили. Це призводить до утворення розрідження у центральній частині колеса та підвищеного тиску на периферії. Завдяки такому розподілу тиску рідина безперервно надходить у напірний патрубок та всмоктувальний трубопровід, забезпечуючи постійний потік через насос.

Відцентрові насоси можуть мати кілька робочих крильчаток, тобто бути багаторівневими, проте принцип їхньої роботи залишається незмінним—рух рідини здійснюється під дією відцентрової сили.

Осьовий насос оснащений крильчаткою, що складається з втулки з закріпленими на ній перфорованими лопатями. При обертанні колеса навколо осі потік рідини впливає на лопаті таким чином, що створюється виштовхувальна сила, спрямована уздовж втулки. Крильчатка осьового насоса розташована у

трубчастій камері, а основний потік рідини рухається в напрямку осі обертання. При цьому середовище, що перекачується, отримує додаткове закручування під впливом крильчатки. Для запобігання неконтрольованому обертанню потоку на певній ділянці камери передбачено коригувальні елементи, які спрямовують рідину в картер і далі в напірну магістраль.

1.3. Опис існуючих методів керування станціями водопостачання

Стабільність роботи гідравлічних систем водопостачання нерозривно пов'язана з раціональним керуванням насосними станціями. Це включає забезпечення заданих параметрів напору та витрати води, що набуває особливої актуальності при коливаннях гідравлічного опору елементів водорозподільчої мережі. У зв'язку з цим, використання оптимальних стратегій регулювання продуктивності насосних агрегатів є визначальним для зростання енергетичної ефективності, гарантування безвідмовності та збільшення ресурсу насосного устаткування.

До головних способів регулювання продуктивності насосних агрегатів належать:

Дроселювання

Дроселювання передбачає зміну гідравлічного опору шляхом регулювання ступеня відкриття запірної арматури (клапанів, засувок). Це дозволяє контролювати витрати води, однак має певні недоліки, зокрема втрати енергії через підвищений опір потоку. Дроселювання є простим методом, однак його застосування доцільне лише за відсутності високих вимог до енергоефективності системи.

Рециркуляція (байпасування)

У методі рециркуляції частина перекачуваної води повертається у всмоктувальний трубопровід або до резервуару. Це дозволяє знижувати навантаження на насос, підтримуючи стабільний режим роботи. Байпасування часто використовується для захисту насосного обладнання від перегріву та роботи в режимах низької продуктивності, що забезпечує його довговічність.

Зміна частоти обертання вала насосного агрегата

Один із найбільш енергоефективних методів регулювання – використання частотного регулювання двигуна, що дозволяє змінювати швидкість обертання вала насоса та, відповідно, його продуктивність. Застосування частотних перетворювачів дає можливість суттєво знизити енергоспоживання та забезпечити плавне регулювання подачі води залежно від поточних умов експлуатації.

Використання гідромуфт

Гідромуфти забезпечують можливість регулювання продуктивності насосного агрегата шляхом зміни переданої потужності між двигуном та насосом. Вони дають змогу адаптувати роботу насосної станції до змінних умов функціонування системи водопостачання, одночасно зменшуючи механічне навантаження на елементи насосного агрегата.

Вибір оптимального методу регулювання

Обираючи метод регулювання продуктивності насосного обладнання, необхідно враховувати технічні характеристики насосів, вимоги до енергоефективності системи, рівень автоматизації, а також економічну доцільність. Крім того, розгляд графіків характеристик насосів відповідно до кожного методу регулювання дозволяє оцінити їхню ефективність та можливість застосування у конкретних умовах експлуатації.

Таким чином, використання сучасних методів регулювання режиму роботи насосних станцій водопостачання сприяє підвищенню загальної ефективності системи, зниженню енерговитрат і забезпеченню стабільного водопостачання для споживачів.

1.3.1. Керування насосом з використанням дроселювання

Регулювання продуктивності насоса шляхом дроселювання полягає у зміні гідравлічного опору системи через коригування положення заслінок або інших регулюючих елементів. (Рисунок 1.3)

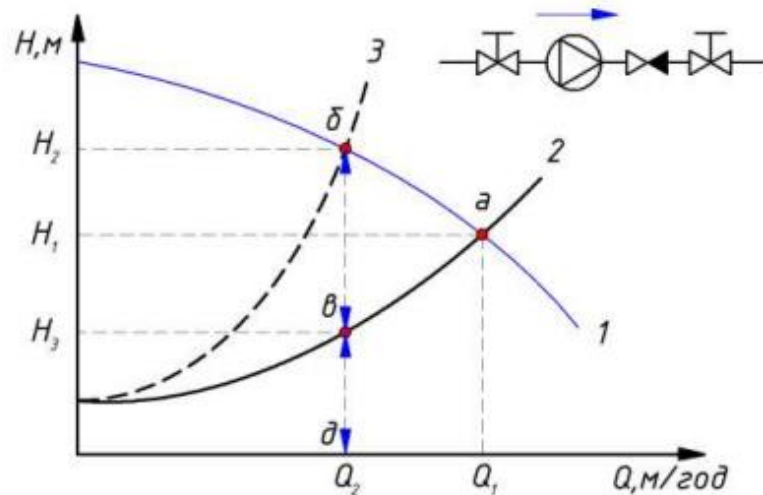


Рисунок 1.3 – Процес регулювання продуктивності насосу за допомогою дроселювання

Якщо регулятори повністю відкриті та не змінюють параметри гідравлічної системи, то робочий режим насоса буде відповідати точці «а». Однак, при частковому закритті регулятора збільшується гідравлічний опір системи, що призводить до підвищення напору насоса. У цьому випадку його робочий режим змінюється та відповідає точці «б».

Для забезпечення необхідної подачі Q_2 насос повинен створювати напір H_3 . Однак, згідно з графіком, при подачі Q_2 насос розвиває напір H_2 , що призводить до виникнення надлишкового напору $H_{рд} = H_3 - H_2$. Це означає, що частина енергії витрачається нераціонально через ступінь дроселювання.

Таким чином, метод регулювання продуктивності насосної станції за допомогою дроселювання не потребує значних фінансових витрат, проте призводить до додаткових енергетичних втрат, що надалі може збільшити витрати на електроенергію.

1.3.2. Керування насосом за допомогою рециркуляції (байпасування)

Регулювання роботи насоса методом рециркуляції передбачає створення паралельного контуру зниженого опору, у якому частина води, що надходить у нагнітальний патрубок, повертається на вхід насоса. Такий підхід дозволяє керувати рівнем напору та витрати води, змінюючи параметри гідравлічної системи. (Рисунок 1.4)

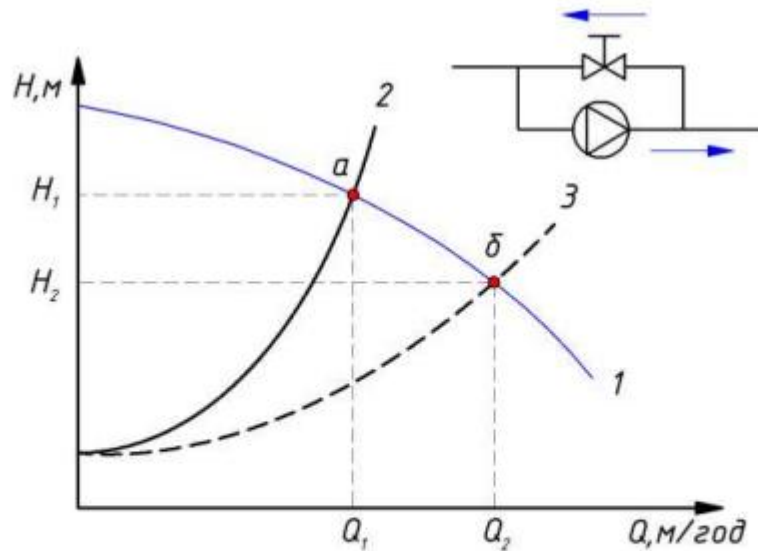


Рисунок 1.4 - Процес регулювання продуктивності насосу за допомогою байпасування

Якщо регулятор повністю відкритий, насос працює у стандартному режимі, що відповідає точці «а» на графіку. При поступовому відкритті рециркуляційного клапана об'єм води, що повертається, зростає, що спричиняє зниження загального напору у системі та коригування подачі води в мережу до необхідних значень.

У цьому випадку насос функціонує у змінених умовах—гідравлічна система, до якої він підключений, набуває інших характеристик у порівнянні з основною мережею водопостачання.

При незмінному гідравлічному опорі основної системи регулятор підтримує необхідний рівень напору, забезпечуючи стабільну подачу води у точці «б».

Проте застосування рециркуляції має певний недолік—додаткове перекачування води через цей контур потребує більше електроенергії, що створює додаткові експлуатаційні витрати. Кількість рідини, що циркулює у рециркуляційному контурі, визначається за формулою $Q_{\text{рец}} = Q_2 - Q_1$.

1.3.3. Керування насосом за допомогою зміни частоти обертання вала насосного агрегату

Регулювання параметрів роботи насоса шляхом зміни частоти обертання його приводного валу призводить до коригування його характеристик. При цьому форма графіка залишається практично незмінною, однак його положення змінюється відносно номінальної характеристики, що відповідає стандартній частоті електроприводу насоса.

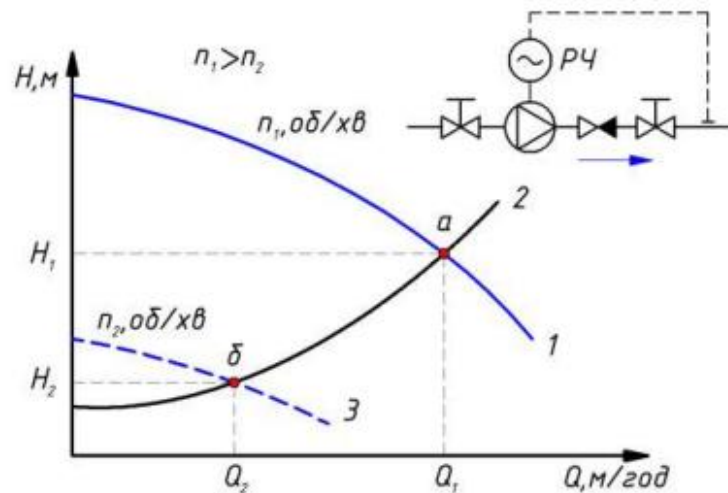


Рисунок 1.5 - Процес регулювання продуктивності насоса за допомогою зміни частоти обертання вала насосного агрегату

Відповідно до рисунку 1.5, у разі відсутності регулювання параметрів роботи насоса та гідравлічної системи його робочий режим визначається точкою «а», при цьому показники подачі води перевищують необхідне значення Q_2 .

Використання частотного регулятора дозволяє скоригувати характеристику насоса таким чином, щоб вона перетиналася з характеристикою мережі в точці «б». У цій точці подача води відповідає заданому рівню, що забезпечує оптимальну роботу системи.

Точка «б» знаходиться на модифікованій характеристиці насоса, яка відповідає зниженій частоті обертання n_2 . Це дозволяє регулювати продуктивність без значних енергетичних втрат, забезпечуючи ефективне використання ресурсів та зменшуючи витрати на електроенергію.

1.3.4. Керування насосу за допомогою гідромуфти

Один зі способів керування роботою насоса передбачає використання гідромуфти. Вона дозволяє змінювати швидкість обертання робочого колеса насоса, не зачіпаючи при цьому частоту обертання вала електроприводу. Завдяки цьому досягається плавна зміна робочих параметрів насосного агрегату, що веде до зростання ефективності його використання.

Конструктивні особливості гідромуфти представлені на рисунку 1.6.

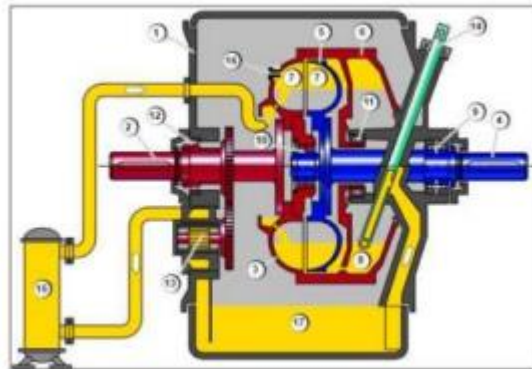


Рисунок 1.6. – Схематичне зображення гідромуфти

Електродвигун приводить у рух колесо гідромуфти (позиція 3), передаючи механічну енергію робочому маслу. В процесі роботи масло прискорюється у первинному колесі, накопичуючи кінетичну енергію потоку, яка потім спрямовується на інше колесо (позиція 5). Це колесо, виконуючи функцію турбіни, отримує енергію потоку, прискорюється та повторно трансформує її в механічну енергію.

Коли об'єм масла, задіяний у передачі крутного моменту між колесами, знаходиться на максимальному рівні, вони обертаються синхронно, що забезпечує збіг частоти обертання вала двигуна із частотою робочого колеса насоса. При зменшенні кількості масла виникає ефект ковзання між колесами (позиції 3 та 5), що призводить до відповідного зниження швидкості обертання робочого колеса насоса.

Використання гідромуфти для регулювання параметрів роботи насоса є доцільним насамперед у великих насосних станціях, особливо для агрегатів

потужністю понад 500 кВт. У системах малого та середнього масштабу цей метод регулювання продуктивності застосовується рідко через його складність та економічну неефективність.

Аналіз різних методів керування насосними агрегатами показує, що найбільш оптимальним з точки зору енергетичних витрат та загальної ефективності є регулювання продуктивності шляхом зміни частоти обертання валу електроприводу насоса.

1.4. Розробка функціональної схеми станції водопостачання

Функціональна схема є основним технічним документом магістерської кваліфікаційної роботи, що визначає структурні взаємозв'язки між компонентами системи автоматичного контролю, управління та регулювання процесу водопостачання. Вона також містить перелік обладнання, яке використовується для автоматизації насосної станції, забезпечуючи надійність та ефективність її роботи.

При розробці функціональних схем автоматизації застосовуються стандартизовані графічні символи та позначення, відповідно до положень ГОСТ 21.404-85 «Прилади і засоби автоматизації». Вони використовуються для точного відображення архітектури системи управління та її ключових елементів.

Автоматизоване керування станцією водопостачання реалізується за допомогою виконавчих механізмів, які здійснюють регулювання тиску, витрати води та параметрів насосних агрегатів. Система управління включає апаратні та програмні компоненти, зокрема контролери Schneider Electric, що забезпечують інтеграцію пристроїв моніторингу та керування процесами водопостачання.

РОЗДІЛ 2. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ СТАНЦІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ

2.1. Аналіз та вибір алгоритму керування станцією водопостачання

Розробка системи автоматизованого керування (САК) для насосної станції є суттєвим етапом оптимізації роботи водопостачальної системи. Одним із найперспективніших напрямків в цьому процесі є впровадження алгоритмів частотного регулювання, що дозволяє тонко налаштовувати режим роботи двигунів насосних агрегатів із забезпеченням високої точності та ефективності управління.

Як показано на рисунку 2.1, існує кілька основних схем організації САК, кожна з яких відображає специфічну архітектуру алгоритму частотного регулювання. Різноманітність підходів дає змогу підібрати оптимальне рішення з урахуванням конкретних експлуатаційних умов, завантаження системи та вимог до управління.

Для вибору найбільш доцільного способу регулювання продуктивності насосної станції необхідно провести комплексну оцінку кожного алгоритмічного варіанту за наступними критеріями:

Точність та діапазон регулювання.

Система повинна забезпечувати стабільне та досконале регулювання режимних параметрів, що визначають оптимальні умови роботи насосів. Висока точність керування дозволяє ефективно підтримувати заданий напір і продуктивність, а широкий регуляторний діапазон сприяє адаптації системи до змінних навантажень.

Функціональні можливості.

Сучасні САК повинні виступати як комплексні засоби обробки даних, що здатні не лише контролювати технологічні процеси у режимі реального часу, але й забезпечувати автоматичне виявлення відхилень, проведення первинної діагностики та інтеграцію з іншими компонентами системи. Розширені можливості інтеграції дозволяють підвищити загальну надійність і ефективність управління.

Енергоефективність.

За допомогою алгоритмів частотного регулювання можна оптимізувати споживання електроенергії, адаптуючи роботу насосних агрегатів до поточних потреб системи. Зниження енергоспоживання не тільки сприяє економії ресурсів, але й позитивно впливає на експлуатаційний ресурс обладнання завдяки зниженню механічних навантажень.

Вартість впровадження та експлуатації. Фінансовий аспект проекту є неодмінним показником його доцільності. Аналіз повинен враховувати початкові інвестиції у розробку та впровадження системи, а також поточні витрати на експлуатацію, обслуговування та можливі модернізації. Оптимальне співвідношення витрат і функціональних можливостей забезпечує довгострокову економічну ефективність проекту.

Отже, вибір алгоритму частотного регулювання для САК насосної станції повинен базуватися на детальному аналізі вищезазначених критеріїв. Такий підхід дозволяє не лише досягти оптимізації технологічних процесів, а й забезпечити надійну експлуатацію системи в умовах змінних навантажень і динамічних зовнішніх факторів.

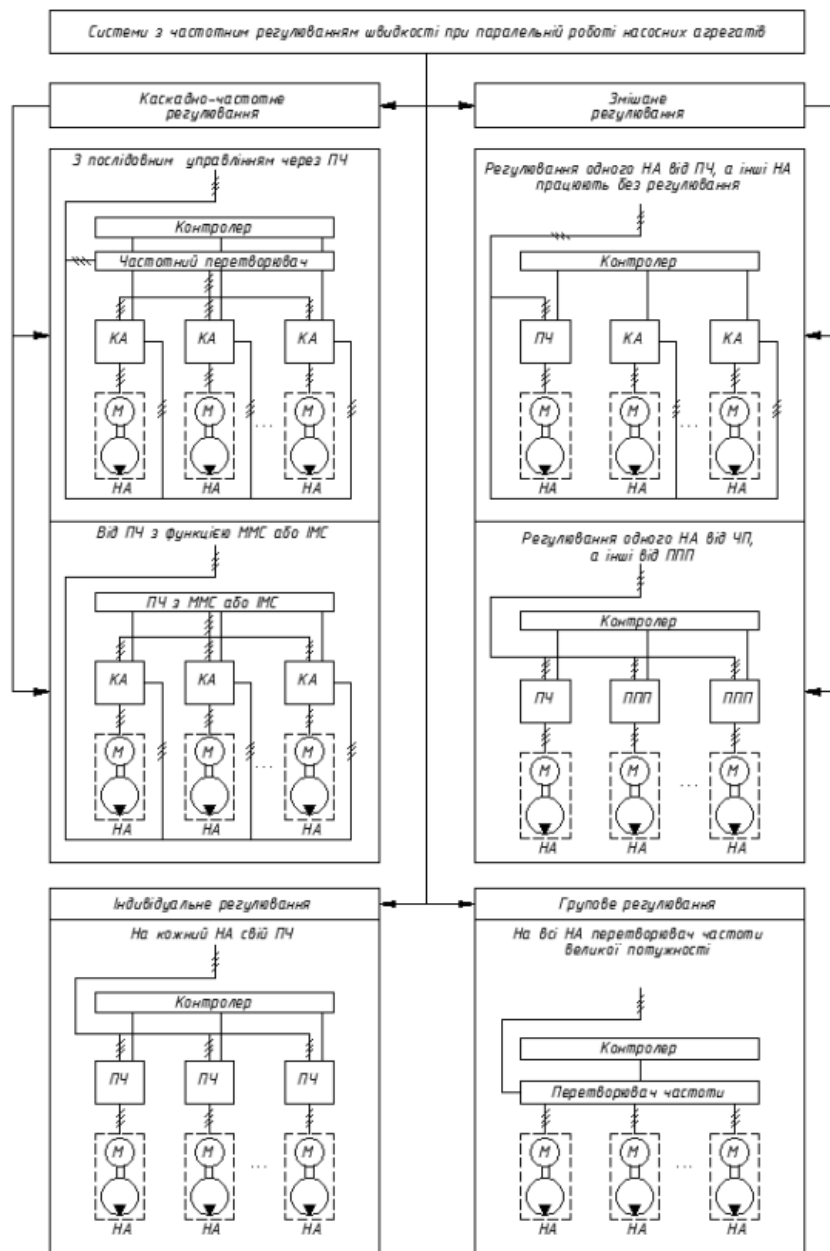


Рисунок 2.1 – Можливі алгоритми побудови САК

Групове регулювання

Даний метод передбачає використання одного частотного перетворювача (ПЧ) для одночасного управління кількома насосними агрегатами. До основних переваг цього підходу належать:

- Відносна простота реалізації. Спільне використання одного ПЧ знижує складність електричної схеми.
- Зменшення кількості електронних компонентів. Це знижує витрати на обладнання й спрощує монтаж.

Проте, подібний підхід має свої недоліки:

- Обмежена точність регулювання. Розподіл сигналів управління між кількома агрегатами може знижувати точність встановлення необхідних режимних параметрів.
- Необхідність додаткового захисту двигунів. Для компенсації можливих коливань параметрів потрібно застосовувати додаткове обладнання.
- Зниження енергоефективності при низькому споживанні води. При малих навантаженнях діапазон регулювання залишається слабо адаптованим до потреб системи.
- Висока вартість потужного ПЧ. Економічна складова впровадження значною мірою залежить від вартості ПЧ, здатного забезпечити одночасну роботу кількох двигунів.

Змішане регулювання

Змішане регулювання поєднує в собі використання одного частотно-регульованого агрегату, що виконує точне регулювання, із групою нерегульованих насосів. Серед переваг цього алгоритму можна виділити:

- Підвищені можливості точного регулювання. Наявність регульованого насоса дозволяє ефективніше адаптувати систему до змінних навантажень.
- Здібність підтримувати необхідні параметри водопостачання. Гнучкість управління сприяє стабільній роботі всієї системи.

Недоліками ж є:

- Стрибки напруги при старті двигунів. Різкі зміни напруги можуть негативно впливати на експлуатаційну стійкість агрегатів.
- Прискорений знос обладнання через часті перехідні процеси. Поперемінне навантаження спричиняє додаткове механічне зношування компонентів.

- Додаткові витрати на пристрої плавного пуску (УПП). Хоча встановлення УПП дозволяє знизити знос системи й зменшити ризик виникнення гідроударів, воно впроваджує додаткові фінансові витрати.

Каскадно-частотне регулювання

Метод каскадно-частотного регулювання особливо актуальний для великих насосних станцій з багатьма агрегатами. Основною ідеєю є послідовне включення додаткових насосів:

Основний насос працює у своєму оптимальному діапазоні і поступово набирає номінальну частоту обертання.

При збільшенні навантаження автоматично активуються додаткові агрегати, а керування їхнім режимом здійснюється шляхом перерозподілу сигналу з основного ПЧ.

У випадку зниження навантаження система здійснює поступове відключення агрегатів у зворотній послідовності.

Переваги даного підходу включають високу якість регулювання, покращену енергоефективність і можливість поступової модернізації системи шляхом інтеграції додаткових пристроїв.

Регулювання з використанням багатомоторних частотних перетворювачів

Сучасні спеціалізовані ПЧ з функцією багатомоторного управління (наприклад, системи ММС – Multi Motor Control або ІМС – Intelligent Motor Control) дозволяють інтегрувати управління декількома насосами в один пристрій. Такий підхід має свої переваги:

- Спрощення архітектури системи за рахунок інтегрованих алгоритмів управління.
- Зниження кількості зовнішніх пристроїв для керування.

Однак недоліки цього варіанту включають:

- захист надається лише для основного двигуна. Решта агрегатів не отримують повноцінного захисту, що може стати критичним у випадку несправностей.
- Порухення роботи усієї станції у разі поломки ПЧ. Вийнятова залежність від одного пристрою створює ризик зупинки роботи всієї системи.
- Обмежений набір функцій. Порівняно зі спеціалізованими системами автоматизації, функціонал може бути знижений.

Індивідуальне регулювання

Індивідуальне регулювання кожного насосного агрегату за допомогою окремого частотного перетворювача є найбільш гнучким і точним підходом до автоматизації. Серед основних переваг цього алгоритму можна виділити:

- Високу точність регулювання. Можливість індивідуального налаштування дозволяє оптимізувати роботу кожного насоса з урахуванням його характеристик та умов експлуатації.
- Широкий діапазон налаштувань. Кожен агрегат може працювати в оптимальному режимі, що сприяє загальній енергоефективності системи.
- Максимальний захист. Завдяки використанню окремих ПЧ для кожного агрегату досягається повний захист від перевантажень, обриву фаз, короткого замикання та інших критичних станів.

Недоліками індивідуального регулювання є:

- Високі початкові фінансові витрати. Реалізація окремої системи регулювання для кожного агрегату потребує значних інвестицій.
- Зростання вартості при збільшенні кількості насосів. Для масштабних систем витрати можуть суттєво зрости.

Обґрунтування вибору алгоритму регулювання

При виборі оптимального алгоритму регулювання слід врахувати як технічні, так і економічні вимоги системи. Оскільки проєктована насосна станція розрахована на роботу лише двох агрегатів, а серед усіх розглянутих підходів найбільшою перевагою є висока точність та гнучкість індивідуального регулювання, саме цей алгоритм було обрано для впровадження.

Крім того, для забезпечення надійності роботи системи як у режимі автоматичного регулювання, так і при виникненні аварійних ситуацій, передбачено можливість комутації насосів до ручного управління. Це дозволяє у випадку відмови частотних перетворювачів перевести агрегати на роботу з номінальною частотою електричної мережі за допомогою відповідної комутаційної апаратури.

2.2. Побудова загальної схеми САК

а основі алгоритму індивідуального регулювання швидкості обертання кожного насосного агрегату з застосуванням окремих частотних перетворювачів розроблено загальну схему роботи САК насосної станції. Загальна структура системи має такі ключові особливості:

Робота в автоматичному режимі. Частотне регулювання дозволяє підтримувати оптимальні параметри кожного агрегату, що сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню експлуатаційної надійності.

Можливість ручного керування. У разі відмови автоматичних компонентів насосні агрегати можна безпосередньо підключити до електромережі через комутаційну апаратуру, забезпечуючи їх роботу на номінальній частоті напруги.

Комплексний підхід до експлуатації. Запропонована схема спрямована на забезпечення стабільної, довговічної та безпечної роботи насосного обладнання шляхом інтеграції як автоматизованих, так і ручних режимів управління.

Результатом реалізації такої архітектури є система, здатна адаптуватися до змін експлуатаційних умов та забезпечувати оперативне реагування на

виникаючі відхилення параметрів роботи насосів. Загальну схему САК представлено на рисунку 2.2.

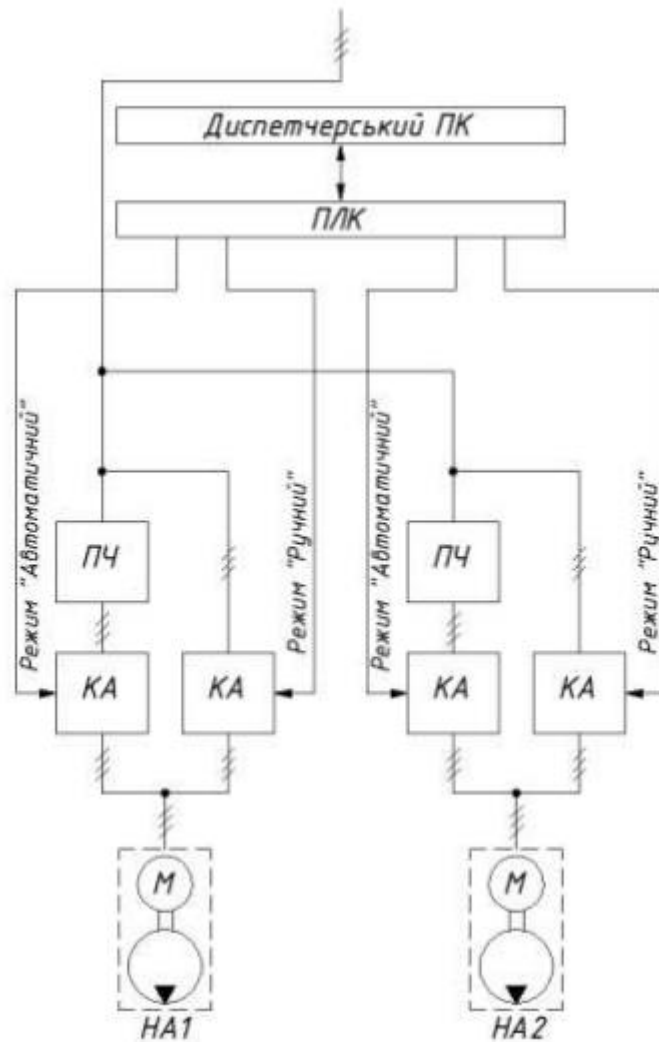


Рисунок 2.2 – Загальна схема САК станції водопостачання

2.3. Алгоритм програми для керування насосною станцією

Відповідно до концепції, на якій базується алгоритм роботи системи автоматизованого керування (САК), була розроблена блок-схема, що ілюструє логіку роботи програми керування насосними агрегатами. Інтелектуальна програма порівнює поточні значення, отримані від засобів автоматизації та давачів, із заздалегідь заданими уставками для визначення активного режиму роботи агрегатів.

Якщо обидва насосних агрегата отримали дозвіл на роботу в автоматичному режимі, система проводить порівняння кількості моточасів, які

вони напрацювали, і видає команду на запуск тому агрегату, у якого моточасів менше. Після старту агрегату запускається лічильник, що враховує його моточаси під час роботи.[5]

У разі відсутності підтвердження від давача потоку про старт роботи агрегату після видачі команди, система генерує сигнал аварійного сповіщення типу «Аварія НА1» або «Аварія НА2» для диспетчерського ПК і ініціює запуск іншого насосного агрегату.

Після отримання підтвердження про роботу запусканого агрегату, здійснюється контроль поточної подачі Q . Якщо значення подачі перевищує встановлену уставку Q_{av} , формуються відповідні сповіщення (сигнал АПС «Прорив») і робота програми продовжується згідно з алгоритмом.

Наступним етапом є моніторинг поточного значення тиску P на вході в систему водорозподілу житлового масиву. Якщо зафіксоване значення знаходиться в нижньому діапазоні (між P_{\min} і $P_{\text{ном-Х}}$), система перевіряє, чи активний інший насосний агрегат. Якщо інший агрегат працює, відбувається поступове збільшення його частоти напруги до межі 50 Гц. Якщо ж інший агрегат не працює, проводиться аналогічна перевірка частоти напруги першого агрегату, і у разі, якщо її значення нижче 50 Гц – відбувається її корекція, або, якщо вона вже досягнута, подається команда для запуску другого агрегату.

Коли значення тиску P на вході системи досягає верхньої межі допустимого діапазону, виконується перевірка роботи насосних агрегатів одночасно. Якщо виявлено, що активним є лише один агрегат, система підвищує його частоту напруги відповідно до початкового вибору, зробленого на основі порівняння моточасів. Якщо ж обидва агрегати працюють, система поступово знижує частоту напруги того агрегату, який був додатково включений, аж до повної його зупинки при досягненні мінімального значення F_{\min}

У випадку, якщо поточне значення тиску виходить за встановлені межі і перевищує P_{\max} або P_{sx} , формується сигнал типу «Перевищена межа тиску» для

диспетчера, після чого відбувається негайне припинення роботи основної програми керування насосними агрегатами.

Паралельно з основною програмою роботи, у фоновому режимі функціонують підпрограми, що здійснюють моніторинг критичних та аварійних ситуацій, що дозволяє оперативно реагувати на можливі збої в системі.

РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТАНЦІ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА SCADA

3.1 Математична модель відцентрованого насосу

Перший блок розробленої моделі насоса спрямований на розрахунок витрати при заданій частоті електроживлення та напорі із застосуванням рівняння, яке описує витратно-напірну характеристику (див. рис. 3.1). [8]

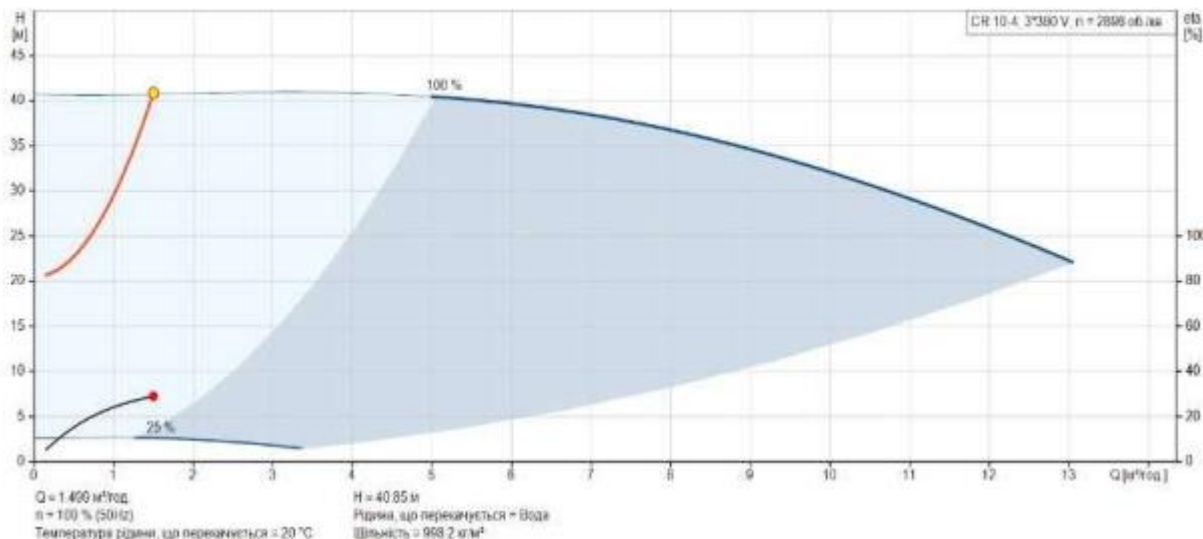


Рисунок 3.1 – Витратно-напірна характеристика

Саму характеристику насоса можна аналітично подати рівнянням повної квадратичної параболи.

$$H_n = a_0 + a_1 Q_n + a_2 H_n^2 \quad (1)$$

У цьому рівнянні:

H_n – напір, який розвивається насосом,

Q_n – подача або продуктивність насоса в певному режимі роботи ($Q_n \neq 0$), при цьому H_n вимірюється в метрах, а Q_n – у кубічних метрах за годину.

Значення a_0 характеризує напір насоса при $Q_n = 0$, а параметри a_0 і a_1 є константами, знаки яких визначають форму витратно-напірної кривої.

Оскільки подача насоса регулюється за допомогою частотного перетворювача (ПЧ), рівняння витратно-напірної характеристики набуває модифікованого вигляду, де:

$$H_n = a_0 \left(\frac{f}{f_{ном}} \right)^2 + a_1 Q_n \frac{f}{f_{ном}} + a_2 H_n^2 \quad (2)$$

Для перевірки роботи цієї моделі як робочу точку було взято параметри: подача $1,5 \text{ м}^3/\text{год}$ і напір $40,8 \text{ м}$, при яких робоча частота встановлюється рівною номінальній (50 Гц) (див. рис. 3.3).

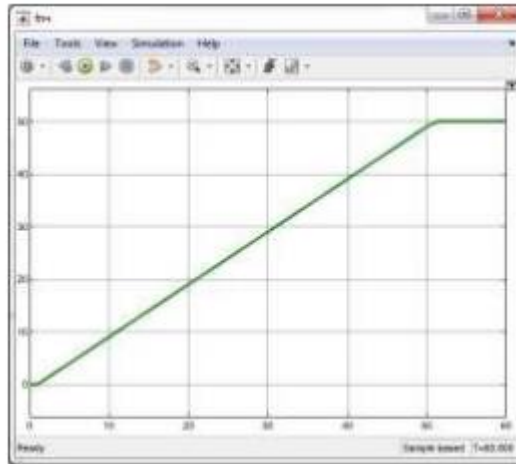


Рисунок 3.3 – Графік виходу на 50 Гц

За результатами моделювання на виході системи очікується виявлення витрати, що дорівнює $1,5 \text{ м}^3/\text{год}$. Факт цього підтверджується – на рисунку 3.4 за 53 секунди значення витрати становить приблизно $1,53 \text{ м}^3/\text{год}$. Також рисунок 3.5 демонструє графік зміни напору в часі при робочій частоті 50 Гц.

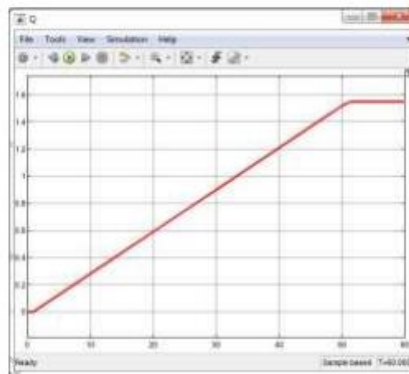


Рисунок 3.4 – Графік витрат при 50 Гц

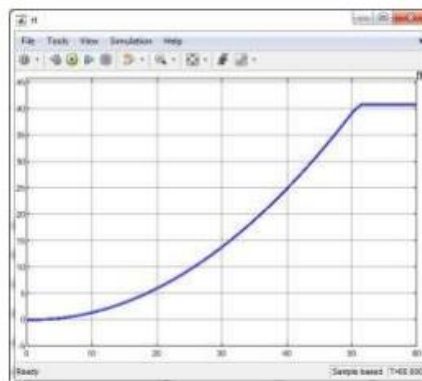


Рисунок 3.5 – Графік зміни напору при 50 Гц

Аналіз графічних даних (рисунки 3.1–3.5) свідчить про те, що модель відповідає витратно-напірній характеристиці насосного агрегату: при досягненні робочої частоти 50 Гц (на 53 секунді) напір і подача набувають передбачених значень.

Обчислювальні аспекти моделювання

$$H_n = a_2 H_n^2 + a_1 Q_n \frac{f}{f_{ном}} + \left(a_0 \left(\frac{f}{f_{ном}} \right)^2 - H_n \right) = 0 \quad (4)$$

В даному рівнянні невідомою величиною є подача Q_n . Щоб знайти її, спочатку обчислюється дискримінант. Якщо дискримінант отримується від'ємним, це призводить до комплексних коренів, що не дозволяє проводити подальші розрахунки.

Тому в моделі використовується спеціальний блок порівняння, який встановлює значення дискримінанту рівним нулю, якщо воно є меншим за нуль, після чого обчислюються корені, і враховується більший з них.

Дослідження показало, що до точки перелому графіка дискримінант дорівнює нулю, а при його переході у додатне значення спостерігається різке зростання витрати. Це пояснюється тим, що модель використовує значення тиску, яке відповідає робочій точці, при цьому тиск квадратично залежить від частоти.

$$H = kf^2.$$

Для визначення коефіцієнта k необхідно знати два значущих значення: точку $(0, 0)$ та точку $(H, f_{ном})$, де H – напір, а $f_{ном}$ – номінальна частота живлення.

Удосконалення моделі

Попередні модифікації моделі дозволили отримати більш плавні графічні залежності напору і витрати від часу, усунувши появу точок перелому. Зміст оновленої частини моделі з внесеними удосконаленнями представлено на рисунку 3.6.

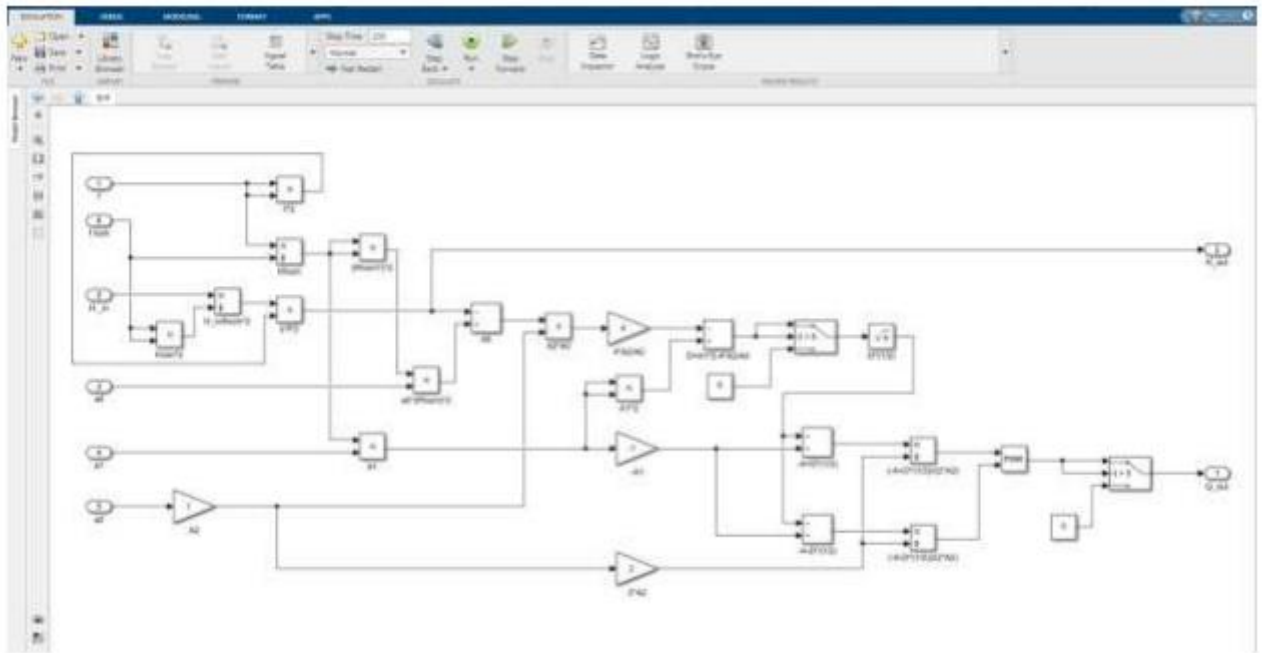


Рисунок 3.6 – Модель з внесеними удосконаленнями

3.2 Математична модель асинхронного двигуна

Насос приводиться в дію асинхронним двигуном (АД). Передаточна функція даного двигуна задається виразом,

$$W(s) = \frac{1}{T_e \cdot T_m \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1}, \quad (5)$$

Де:

- T_e – електромагнітна стала часу,
- T_m – електромеханічна стала часу.

З огляду на інерційність як електродвигуна, так і насоса, внесок електромагнітної сталої можна знехтувати, що спрощує передаточну функцію до аперіодичної ланки першого порядку.

Щоб врахувати додаткову інерційність, яку впроваджує робоче колесо АД, вводиться часова стала T_{pk} (часова стала робочого колеса). Сумарну часову характеристику системи умовно позначають як T_n , де $T_n = T_m + T_{pk}$.

При такому підході передаточна функція АД набуває вигляду:

$$W(s) = \frac{1}{T_H \cdot s + 1}, \quad (6)$$

Цей вираз відображає спрощену динаміку агрегату з урахуванням сумарної інерційності насоса та приводу.

Згідно з виразом (6) до блоку, що моделює роботу відцентрового насоса, додано окремий блок, який враховує інерційні характеристики як самого насоса, так і його приводу. Завдяки цим удосконаленням, загальна модель системи представлена на рисунку 3.7.

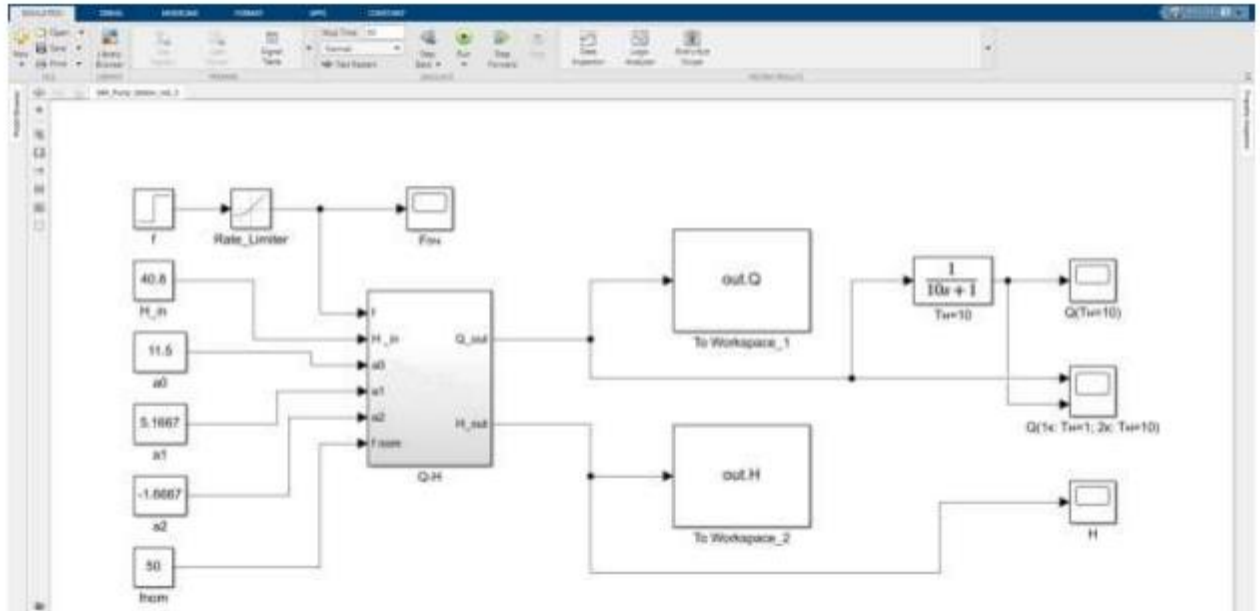


Рисунок 3.7 – Модель асинхронного двигуна

На рисунку 3.8 показані перехідні процеси, що відбуваються для значень $T_n = 1$ та $T_n = 10$ при робочій частоті електроживлення 50 Гц.



Рисунок 3.8 - Графік

Для визначення стійкості та точності роботи моделі при частоті живлення, відмінній від номінальної, можна змоделювати ситуацію за умови, що робоча частота задається як 30 Гц (див. рисунок 3.9). Таким чином, при вихідній частоті 40 Гц (80% від номінальної) модель повинна забезпечувати напір 27 м при подачі 0,9 м³/год.

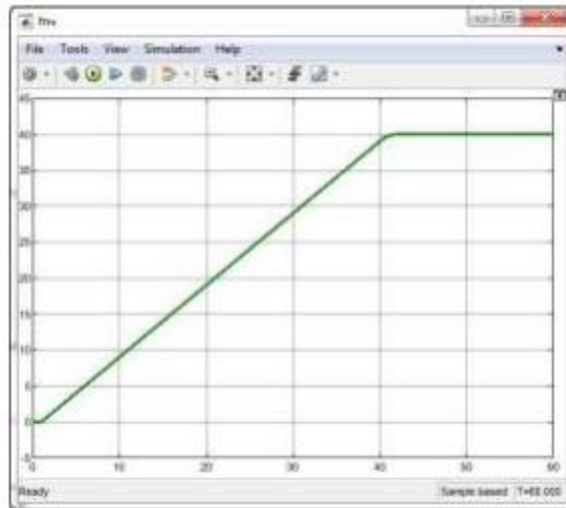


Рисунок 3.9 – Графік при частоті 40 Гц

Графік зміни напору з часом при робочій частоті 40 Гц представлено на рисунку 3.10. З аналізу графіка видно, що на 32 секунді значення подачі складає приблизно 0,93 м³/год, що відповідає заданому значенню з відхиленням всього 3,3%.

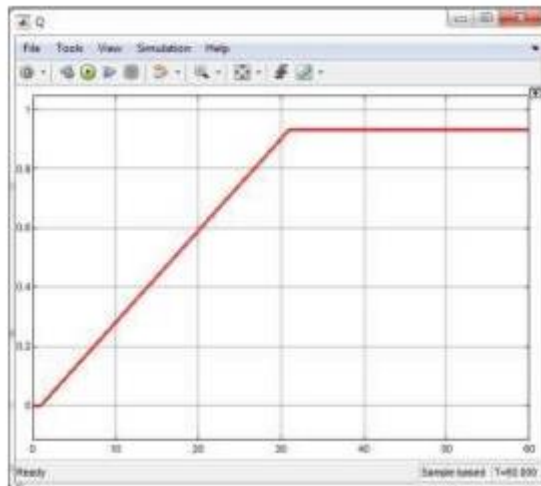


Рисунок 3.10 – Графік зміни в часі подачі

Також графік залежності подачі від часу, зображений на рисунку 3.11, відповідає значенням, що визначені за напірно-витратною характеристикою насосного агрегату.

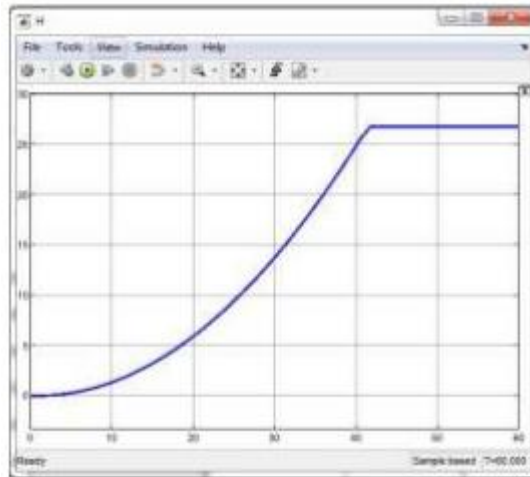


Рисунок 3.11 – Графік зміни напору

3.3 SCADA система для станції водопостачання

Візуалізація є ефективним способом представлення інформації у формі наочних образів, таких як графічні діаграми, схеми, структуровані таблиці, фотографії або карти. Використання цього методу дозволяє значно полегшити сприйняття складних даних, сприяє покращенню аналізу та швидкому прийняттю рішень.[11]

Для впровадження візуалізації у системах контролю застосовуються такі підходи:

- SCADA-системи, які забезпечують інтерактивне керування технологічними процесами.
- Пульти керування, що дають змогу оперативно візуалізувати стан об'єкта управління.
- Контролери з дисплеями, що дозволяють здійснювати локальний моніторинг параметрів процесу.

Вибір засобів візуалізації

Підбір відповідних технічних засобів для реалізації візуалізації залежить від складності системи, обсягу даних та масштабів об'єкта управління. У великих технологічних комплексах перевага надається SCADA-системам, які представляють собою програмно-апаратні комплекси для моніторингу та керування виробничими процесами.

SCADA-системи забезпечують оператору доступ до інтегрованого графічного інтерфейсу, що дозволяє в режимі реального часу контролювати параметри системи та оперативно реагувати на зміни.

Реалізація візуалізації в автоматизованій системі

З урахуванням доступних технічних ресурсів, для розробки операторського інтерфейсу була використана відповідна SCADA, що є сучасним рішенням для автоматизації технологічних процесів (АСУТП). Дане рішення було адаптоване для забезпечення контролю та управління процесом сушіння зерна, дозволяючи оператору ефективно взаємодіяти з системою та оптимізувати параметри процесу. SCADA система зображена на рисунку 3.12.

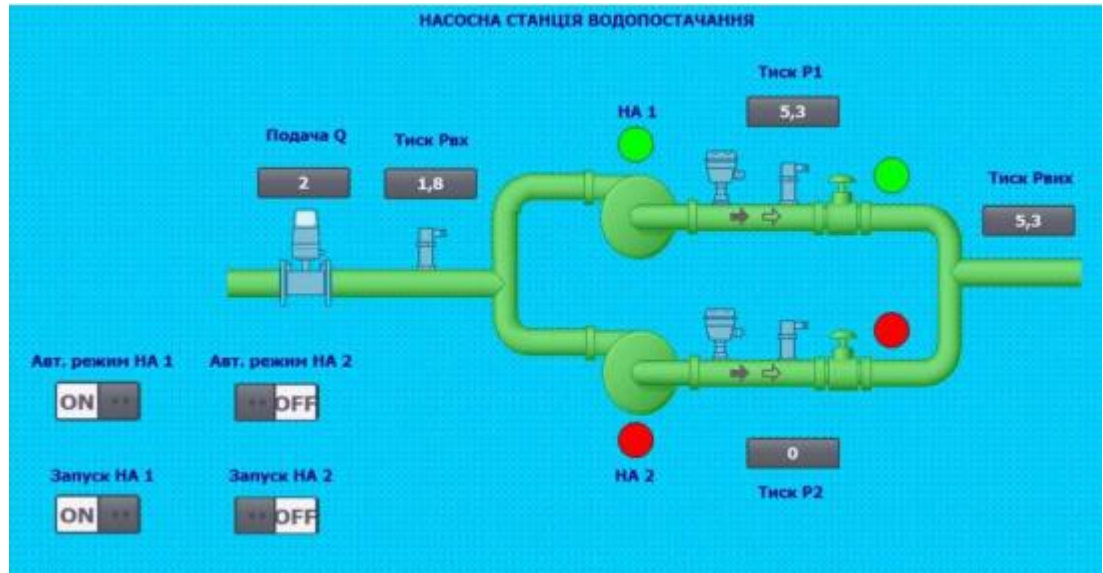


Рисунок 3.12 – SCADA система

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Вибір та опис обладнання для реалізації САК

Для реалізації системи автоматичного керування було обрано наступне обладнання на базі Schneider Electric.

Перетворювач частоти

Для реалізації енергоефективного керування швидкістю обертання робочих коліс насосних агрегатів було обрано частотні перетворювачі (ПЧ) серії ATV320 (рисунок 4.1) виробництва Schneider Electric. Вибір зумовлений номінальною потужністю насосних агрегатів (1,5 кВт) та вимогами до надійності і функціональності системи.[1] Модель ATV320U22N4C (2,2 кВт, 380-500В) забезпечує необхідний запас по потужності та має ряд переваг для застосувань у насосних системах:

Енергозбереження: ПЧ дозволяє регулювати швидкість двигуна відповідно до реальної потреби в подачі води, що значно знижує споживання електроенергії порівняно з дросельним регулюванням або роботою на повній швидкості. Закони подібності для насосів показують, що споживана потужність пропорційна кубу швидкості обертання, що робить частотне регулювання найбільш ефективним методом.

Спеціалізовані функції для HVAC та насосів: ATV320 має вбудовані функції, такі як ПД-регулятор для підтримки заданого тиску або витрати, функція "сон/пробудження" для оптимізації роботи при низькому споживанні, захист від сухого ходу.

Вбудований ЕМС-фільтр: Наявність вбудованого фільтра електромагнітної сумісності (категорії C2/C3 в залежності від моделі) знижує рівень електромагнітних завад, що важливо для стабільної роботи іншого електронного обладнання.

Комунікаційні можливості: Підтримка протоколу Modbus RTU (стандартно) дозволяє легко інтегрувати ПЧ в загальну систему автоматизації під керуванням ПЛК. Також можливе використання додаткових комунікаційних карт для інших протоколів (BACnet, LonWorks тощо).

Надійність та захист: ПЧ забезпечує комплексний захист електродвигуна від перевантаження по струму, перенапруги, зниженої напруги, перегріву та інших нештатних режимів.

Плавний пуск та зупинка: Забезпечується плавний розгін та гальмування насосних агрегатів, що зменшує механічні навантаження на обладнання та гідравлічні удари в трубопроводах.



Рисунок 4.1 – Перетворювач частоти ATV320 Schneider Electric

Програмований логічний контролер

Для побудови САК було визначено необхідні компоненти, що формують конфігурацію контролера та його функціональні можливості відповідно до поставлених завдань у технічному проекті.

Як основний обчислювальний елемент обрано центральний процесор компанії Schneider Electric, що входить до серії Modicon M241 (TM241CE24T), зображений на рисунку 4.2.

Вибір даної моделі ґрунтується на її технічних характеристиках, які забезпечують необхідний рівень продуктивності для виконання задач автоматизації насосної станції.[1]



Рисунок 4.2 – Modicon M241 Schneider Electric

Технічні характеристики контролера:

- Кількість дискретних входів – 14;
- Кількість дискретних виходів – 10;
- Кількість модулів розширення – 7/14
- Середовище для розробки ПЗ – Expert Machine;
- Годинник реального часу – в наявності;
- Напруга дискретного входу – 24 В;
- Максимальний пусковий струм – 50 А.

Панель інтерфейсу НМІ

Для контролю системи за допомогою оператора, було обрано панель НМІ від компанії Schneider Electric, а саме сенсорна панель оператора 10" Harmony ET6, =24В, Ethernet (НМІЕТ6500), зображена на рисунку 4.3.[1]



Рисунок 4.3 – Панель оператора НМІ

Контактор для насосів

Для керування роботою та захисту приводів насосних агрегатів використано два контактори, оснащені механічним взаємним блокуванням, що запобігає одночасному включенню пристроїв. У якості основного компонента обрано контактори типу TeSys D 25A 24V DC Schneider LC1D25BD (рисунок 4.4), що забезпечують надійність та безпеку експлуатації насосного обладнання.[1]



Рисунок 4.4 – TeSys D Schneider Electric

Основні технічні характеристики TeSys D 25A 24В DC Schneider (LC1D25BD):

- Застосування – резистивне навантаження, керування двигуном;
- Категорії застосування – АС-4, АС-3, АС-1, АС-3е;
- Кількість полюсів – 3Р;
- Кількість силових контактів – 3;
- Напруга – 24В DC;
- Номінальний струм – 25А;
- Тип контактів – 3 NO;
- Ступінь захисту – IP 20.

Автоматичний вимикач для захисту насосів

Для забезпечення захисту та контролю роботи електродвигунів насосів у системі автоматизованого керування використано автоматичні вимикачі GZ1E14 Schneider Electric[1] (3-полюсні, 6...10 А), що зображений на рисунку 4.5.



Рисунок 4.5 – EasyTeSys Schneider Electric

Основні технічні характеристики автоматичного вимикача:

- Межі регулювання теплового захисту – 6...10 А;
- Кількість полюсів – 3 Р;
- Відключаюча здатність – 100 кА при напрузі 400/415 В відповідно до МЕК 60947-2;

– Категорія застосування – АС-3;

– Ступінь захисту – IP 20.

Автоматичний вимикач для захисту перетворювачів частоти

Для забезпечення надійного захисту частотних перетворювачів від перевантаження або короткого замикання використано автоматичні вимикачі іС60Н 3Р 25А С 10кА Schneider Electric (А9F89325), на рисунку 4.6.[1]



Рисунок 4.6 – Автоматичний вимикач іС60

Використання цих пристроїв дозволяє мінімізувати ризик аварійних ситуацій та забезпечує безпечну експлуатацію системи автоматизованого керування станцією водопостачання.

Технічні характеристики:

– Крива відключення – С;

– Кількість полюсів – 3Р;

– Відключаюча здатність – 10 кА;

– Номінальний струм – 25 А;

Автоматичний вимикач для ланцюгів керування

Для забезпечення надійного захисту ланцюгів управління від можливих перевантажень або коротких замикань у системі застосовано автоматичні

вимикачі Acti9 IК60 6А 1Р С 6кА Schneider Electric (А9К24106), зображено на рисунку 4.7.[1]



Рисунок 4.7 Автоматичний вимикач ІК60

Технічні характеристики:

- Номінальний струм – 6 А
- Відключаюча здатність – 6 кА
- Кількість полюсів – 1Р
- Крива відключення – С

Клапан зворотного ходу з електронним контролем стану

Клапан зворотного ходу – є важливим елементом трубопровідних систем, призначеним для запобігання небажаному реверсивному руху робочого середовища та згладжування перепадів тиску. Його встановлення поблизу обладнання, яке чутливе до напрямку потоків, дозволяє вирішити низку ключових технічних задач:

- Захист системи та обладнання від раптових змін тиску, що можуть спричинити механічні пошкодження або збої в роботі насосного обладнання.
- Забезпечення стабільності напрямку потоку рідини, що особливо важливо для безперебійної роботи систем водопостачання.
- Оптимізація параметрів тиску в системі, що сприяє її ефективному функціонуванню.

Типи конструкцій клапанів

Існує кілька основних типів клапанів зворотного ходу:

- **Кулькові** – механізм дії заснований на сферичному елементі, який змінює положення залежно від руху робочого середовища.
- **Дводискові** – складаються з двох частин, що відкриваються або закриваються відповідно до напрямку потоку.
- **Підйомні** – функціонують за рахунок переміщення запірною елемента під дією силового потоку.

Серед представлених варіантів підйомні клапани є найбільш розповсюдженими завдяки їхній високій надійності та ефективному герметизуванню.

Удосконалення конструкції клапана

Попри існуючі варіанти клапанів, виникає необхідність у їхньому вдосконаленні для досягнення таких ключових переваг:

- Підвищення технологічності виробництва через оптимізацію форми корпусу, що сприяє зниженню витрат на виготовлення.
- Посилення надійності шляхом інтеграції елементів автоматизованого контролю та моніторингу роботи клапана.
- Спрощення монтажу та обслуговування, що покращує експлуатаційні характеристики.
- Розширення функціональних можливостей за рахунок впровадження системи електронного контролю стану.

Давач тиску

У процесі проектування системи автоматизованого керування насосною станцією важливим завданням є точне вимірювання тиску як на вході насосних агрегатів, так і на їх виході. Для досягнення цієї мети обрано давач тиску Schneider Electric XMLP010BC21F з діапазоном вимірювання від 0 до 10 бар. Цей прилад забезпечує високу точність показників у реальних експлуатаційних

умовах, що дозволяє ефективно здійснювати контроль за параметрами роботи системи.

Технічні характеристики давача тиску Schneider Electric XMLP010BC21F:

Вимірюване середовище: Пристрій розрахований на вимірювання тиску в повітрі, газах та рідинах, що забезпечує універсальність його застосування в різноманітних системах.

Напруга живлення: Давач працює в діапазоні напруги 12...24 В постійного струму (DC), що сприяє стабільній роботі пристрою.

Діапазон виміру тиску: Прилад надає можливість точного вимірювання тиску в межах 0...10 бар, що включає як абсолютне, так і відносне значення тиску.

Стандарт підключення: Використання стандарту 4...20 мА забезпечує сумісність з більшістю систем збору та обробки даних, що застосовуються у сучасних системах автоматизації.

Допустима довжина кабелю: Давач дозволяє використовувати кабелі довжиною до 500 метрів, що є важливим при встановленні у складних системах з розподіленим розташуванням обладнання.

Технологічне з'єднання: Пристрій обладнаний з'єднанням типу G1/4A, яке гарантує надійність механічного кріплення та герметичність з'єднання.

Ступінь захисту: Відповідність стандарту IP65 забезпечує високий рівень захисту давача від пилу та вологи, що дозволяє його використовувати в агресивних експлуатаційних середовищах.

На рисунку 4.8 наведено зовнішній вигляд давача тиску Schneider Electric XMLP010BC21F, що демонструє його компактні розміри та зручність монтажу у виробничих системах.



Рисунок 4.8 – Давач тиску Schneider Electric

Таким чином, впровадження давача тиску Schneider Electric XMLP010BC21F у систему автоматизованого керування забезпечує точне вимірювання тиску, необхідного для моніторингу ефективності роботи насосних агрегатів, а також сприяє підвищенню надійності та безпеки експлуатації насосної станції.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТАНЦІЄЮ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Для обґрунтування економічної ефективності впровадження автоматизованої системи керування (АСУ) важливо ідентифікувати ключові джерела її ефекту. Комплексний аналіз можливих результатів використання АСУ дозволяє врахувати як прямі, так і опосередковані вигоди, що значно впливають на загальну економічну доцільність проекту.

Впровадження автоматизованої системи керування виробничими процесами може спричинити наступні позитивні ефекти:

Економія прямих витрат на працю: Завдяки автоматизації зменшується потреба у великій кількості обслуговуючого персоналу, що дозволяє скоротити витрати на оплату заробітної плати.

Підвищення продуктивності праці: Автоматизація процесів і оптимізація виробничих операцій сприяють збільшенню обсягів виробництва та покращенню якості продукції.

Економія витрат на електроенергію: За рахунок використання систем автоматичного управління, зокрема керування освітленням, опаленням і кондиціонуванням, можлива оптимізація енергоспоживання, що знижує витрати на електроенергію.

Покращення умов праці: Автоматизовані системи дозволяють звільнити персонал від виконання виснажливої або небезпечної роботи, що підвищує рівень безпеки і сприяє підвищенню загального комфорту робочого середовища.

Спрощення технологічних схем: Інтеграція АСУ дозволяє зменшити складність технологічних процесів, замінити ручне керування автоматичним і впровадити сучасні засоби цифрової обробки даних. Це сприяє зниженню часу виробництва, зменшенню витрат на матеріали та покращенню загальної продуктивності.

Для проведення комплексної оцінки ефективності впровадження АСУ здійснюється розрахунок зведених витрат, що враховують як річні

експлуатаційні витрати, так і капітальні вкладення. Загальну модель розрахунку можна представити наступною формулою:

$$V_{ЗВ} = C + E_n * K,$$

де: $V_{ЗВ}$ – зведені витрати, грн./рік; C – річні експлуатаційні витрати, грн./рік; K – капітальні витрати, грн.; E_n – нормальний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, рік ($E_n=0,15$).

Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати складаються з кількох компонентів:

- Витрати на оплату праці ($C_з$): Визначаються виходячи з тарифних ставок. Наприклад, якщо прийняти базову ставку
- грн/год, то відповідна сума визначається згідно з нормами робочого часу.
- Амортизаційні відрахування (C_a): Обчислюються за відсотковим відношенням до балансової вартості обладнання, наприклад,

$$C_a = 0,18K$$

- Витрати на поточний ремонт ($C_{рр}$): Цей компонент може становити близько 18% від балансової вартості обладнання.
- Витрати на енергоресурси (C_e): Розраховуються за формулою:

$$C_e = P * \Gamma_{річн.} * 1.68 \text{ грн}$$

Інші прямі витрати (C_d): Приймаються рівними 1% від загальної суми експлуатаційних витрат.

Комплексні експлуатаційні витрати визначаються як:

$$C = C_з + C_a + C_{рр} + C_e + C_d$$

Розрахунок капітальних витрат

Капітальні вкладення включають наступні компоненти:

- Закупівля технічних засобів автоматизації ($K_з$): Вартість обладнання визначається згідно з інформацією з прайс-листів виробників. За умовними даними:

$K_3 = 22519 + 3130 + 1189 \cdot 2 + 322 \cdot 4 + 1659 \cdot 2 + 18227 + 17220 \cdot 2 + 4740 \cdot 2 = 94780$
грн.

- Торгівельно-транспортні витрати ($K_{тт}$): Визначаються як 11% від K_3

$$K_{тт} = 0,11 \cdot K_3 = 10\,425,8 \text{ грн.}$$

- Витрати на монтаж (K_m): Розраховуються як 17% від K_3

$$K_m = 0,17 \cdot K_3 = 16\,112,6 \text{ грн.}$$

- Витрати на проводку ($K_{пр}$): Наприклад,

$$K_{пр} = 100 \cdot 27 = 2700 \text{ грн.}$$

- Інші витрати (K_i): Приймаються рівними 2000 грн.

Отже, сума капітальних вкладень визначається за формулою:

$$K = 94780 + 10425,8 + 16112,6 + 2700 + 2000 = 126\,018,4 \text{ грн.}$$

Далі проводяться розрахунки додаткових складових:

- Амортизаційні відрахування:

$$C_a = 0,142 \cdot K = 17894,61 \text{ грн.}$$

- Витрати на поточний ремонт:

$$C_{пр} = 0,18 \cdot K = 22683,31 \text{ грн.}$$

- Оплата праці персоналу:

$$C_3 = 12 \cdot 6700 = 80400 \text{ грн.}$$

Таким чином, загальні річні експлуатаційні витрати складають: 120 979.92
грн.

Зведені витрати визначаються:

$$V_{зв} = 120979,92 + 0,15 \cdot 126018,4 = 139882,68 \text{ грн.грн.}$$

Чистий прибуток розраховується як сума економії за рахунок зниження витрат на оплату праці та економії енергоресурсів.

За умовним прикладом, економія у вигляді зниження витрат на оплату праці становить 80400 грн.

Для визначення доцільності інвестицій вводиться показник терміну окупності що обчислюється за наступною формулою:

$$T_{\text{ок}} = K/\Gamma = 126018.4/80400 \approx 1.5 \text{ роки}$$

Отримані результати свідчать, що впровадження розробленої автоматизованої системи керування є економічно обґрунтованим, оскільки термін окупності складає близько одного року. Це дозволяє стверджувати, що інвестиції в автоматизацію управлінських процесів забезпечують значну економію витрат на оплату праці, енергоспоживання та експлуатаційне обслуговування, що в цілому сприяє підвищенню продуктивності та ефективності виробництва.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було успішно вирішено завдання розробки та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування станцією водопостачання з використанням контрольно-технічних засобів (КТЗ) Schneider Electric.

У ході виконання роботи було досягнуто наступних результатів:

1. Проведено детальний аналіз існуючих методів керування насосними станціями та технологічних процесів водопостачання. На основі аналізу обґрунтовано вибір індивідуального частотного регулювання для двох насосних агрегатів як найбільш ефективного та гнучкого підходу для забезпечення стабільного тиску та оптимізації енергоспоживання.
2. Розроблено алгоритм автоматичного керування насосною станцією, що включає логіку підтримання заданого тиску в мережі, чергування роботи насосів для рівномірного зносу, обробку аварійних ситуацій, а також можливість переходу в ручний режим керування.
3. Створено математичну модель насосної станції, яка включає моделі відцентрового насоса та асинхронного приводного двигуна. Проведене моделювання в середовищі (ймовірно, MATLAB/Simulink, хоча конкретно не вказано, але це стандарт для таких задач) підтвердило працездатність розроблених алгоритмів та адекватність динамічних характеристик системи при різних режимах роботи.
4. Здійснено обґрунтований вибір компонентів автоматизації виробництва Schneider Electric, зокрема програмованого логічного контролера Modicon M241, частотних перетворювачів ATV320, панелі оператора Harmony HMI, відповідних давачів тиску та захисно-комутаційної апаратури. Це забезпечує високу надійність, сумісність елементів та широкі функціональні можливості системи.

5. Розроблено людино-машинний інтерфейс (SCADA-систему) для візуалізації технологічного процесу, моніторингу основних параметрів роботи станції та оперативного втручання.
6. Проведено техніко-економічне обґрунтування, яке продемонструвало економічну доцільність впровадження розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи керування. Розрахунковий термін окупності становить близько 1,5 року, що свідчить про високу ефективність інвестицій за рахунок економії енергоресурсів та оптимізації експлуатаційних витрат.

Таким чином, мета магістерської кваліфікаційної роботи – розробка надійної та ефективної комп'ютерно-інтегрованої системи керування насосною станцією водопостачання з використанням технологій Schneider Electric – була досягнута. Розроблена система дозволяє підвищити енергоефективність, надійність та стабільність роботи насосної станції, а також покращити умови праці обслуговуючого персоналу. Результати роботи мають практичну цінність і можуть бути рекомендовані для впровадження на реальних об'єктах водопостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://www.se.com/ua/uk/>
2. Шуруб Ю.В., Дудник А.О. Методичні вказівки до лабораторних робіт з Теорії автоматичного керування: - К.: Видавничий центр НУБіП України, 2015. – 92 с.
3. Методи синтезу та аналізу систем автоматичного керування в АПК/ В.Лисенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць – К.: КомПрінт,, 2017. – 621 с.
4. Цифрові системи керування. Навчальний посібник / Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Дудник А.О., Лисенко В.П. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2016. – 110 с.
5. Комп'ютерно-інтегровані технології. Методичні вказівки для студентів спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Укладачі: Лендел Т.І., Лисенко В.П. ТОВ «ПРІНТЕКО». С. 9
6. Кіктєв М.О., Лукін В.Є, Дудник А.О. Методичні вказівки до лабораторних робіт з Автоматизації технологічних процесів і виробництва: - К.: Компрінт, 2017. – 298 с
7. Електроніка і мікропроцесорна техніка. Навчальний посібник.[В.І. Сенько, В.П. Лисенко, О.М. Юрченко, В. Є. Лукін, А.А. Руденський]-К: Агросвіт, 2015 – 676 с.
8. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів. Навчальний посібник. / В.Лисенко, Є.Чернишенко, В.Решетюк, В.Мірошник, Н.Заєць, І.Цигульов. – К.:АграрМедіаГруп, 2016. – 476 с.
9. В.П.Лисенко, І.М.Болбот «Комп'ютери та комп'ютерні технології. Частина 1. Програмування в математичному пакеті MathCAD»
10. Методичні вказівки до розробки дипломної роботи для студентів із спеціальності 8.05020201 - Автоматизація управління технологічними процесами/ Укл. Лисенко В.П., Шворов С. А., Коваль В.В., Решетюк В.М., Мірошник В. О., Шуруб Ю. В., Осипенко В. В., Цигульов І. Т., Руденський А. А., Гладкий А. М., Болбот І. М., Лукін В.Є., - К.: НУБіП, - 2014.

11. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

12. Ладанюк, А. П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навч. посіб. / А. П. Ладанюк, К. С. Архангельська, Л. О. Власенко — К.: НУХТ, 2014. — 274 с.

13. Автоматизація технологічних процесів та виробництв./Лукін В.Є., Мірошник В.О., Цигульов І.Т. // Навчальний посібник. – К.: ЦП «Компринт», 2016. – 472 с.

14. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. Основи автоматики: теорія і практика (ч. 2)/ Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К., Освіта України, 2015. – 454 с

15. Методика та організація наукових досліджень : Навч. посіб. / С. Е. Важинський, Т. І. Щербак. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. – 260 с.

16. Електроніка та мікропроцесорна техніка. Навчальний посібник / Л. В. Лесовой, І. В. Костик, Я. В. Грень. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. 268 с.