

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

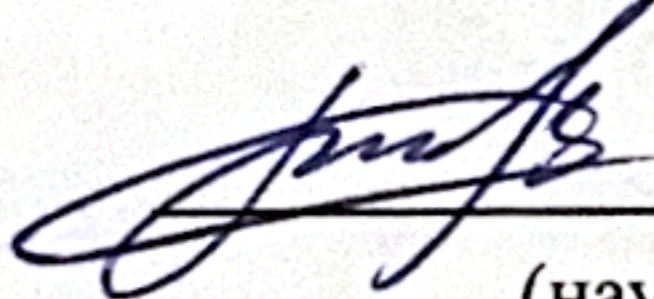
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
**«МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВОДОПРОВІДНОГО
НАСОСНОГО КОМПЛЕКСУ»**

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-23мс
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

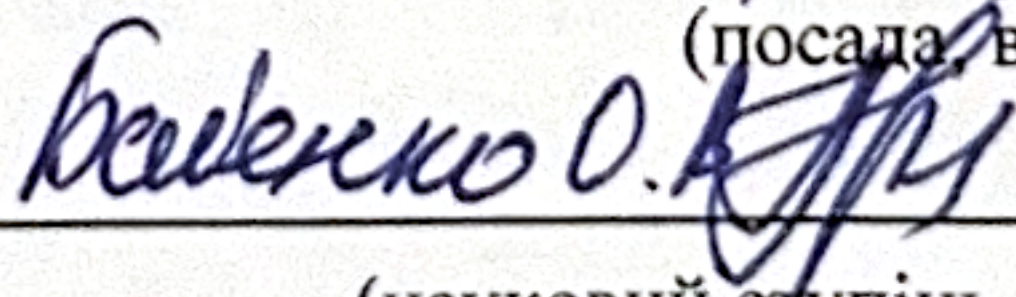
 Тимофій ПАЛЯНИЦЯ
(прізвище та ініціали)

Керівник К.Т.Н. ст.викл. каф. КЕМСК
(посада, вчене звання)

 Вадим БОМБИК
(науковий ступінь, прізвище та ініціали)

« 20 » травня 2025 р.

Рецензент К.Т.Н. доц. доцент кафедри ЕССЕМ
(посада, вчене звання)

 О. КОШНОРИЗ
(науковий ступінь, прізвище та ініціали)

« 10 » червня 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри КЕМСК
К.Т.Н., доц. Мошноріз М.М.
(прізвище та ініціали)

«3» червня 2025 р.

м. Вінниця – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Освітній ступінь перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. Микола МОШНОРІЗ

“18” лютого 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Паляниці Тимофію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація електропривода водопровідного насосного комплексу

керівник роботи Бомбик Вадим Сергійович, к.т.н., ст. викл. каф. КЕМСК

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” березня 2025 року № 97

2. Строк подання студентом роботи 03.06.2025

3. Вихідні дані до роботи: подача насосу 1 – 1500 м³/год; подача насосів 2–4 – 1250 м³/год; подача насосу 7 – мінімальна 400 м³/год; подача насосів 8-10 – 2000 м³/год; подача насосу 12 – 3200 м³/год

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): характеристика водопровідного насосного комплексу; альтернативні шляхи підвищення ефективності насосних станцій; розробка системи керування насосним комплексом з САРП; охорона праці. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1) Характеристика водопровідного насосного комплексу;

2) Способи регулювання параметрів насосної установки;

3) Функціональні схеми активного регулювання продуктивності;

4) напірно-витратні (H-Q) і енергетичні (P-Q, η -Q) характеристики поворотноголопатної гідротурбіни

5) структурна схема водопровідного насосного комплексу з регулюванням параметрів дроселювання

6. Консультанти розділів роботи

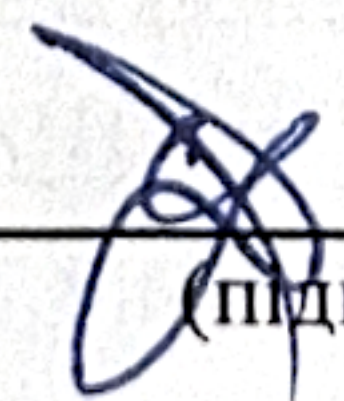
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	к.т.н., ст. викл. каф. КЕМСК Бомбик В.С.	18.02.2025	06.05.2025
Охорона праці	Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф. Кобилянський О. В.	18.02.2025	06.05.2025

7. Дата видачі завдання 18.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	18.02.2025	Вик
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	06.05.2025	Вик
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	20.05.2025	Вик
4	Виконання розділу «Охорона праці»	20.05.2025	Вик
5	Попередній захист БКР	03.06.2025	Вик
6	Нормоконтроль БКР	03.06.2025	Вик
7	Рецензування БКР	10.06.2025	Вик
8	Захист БКР	20.06.2025	Вик

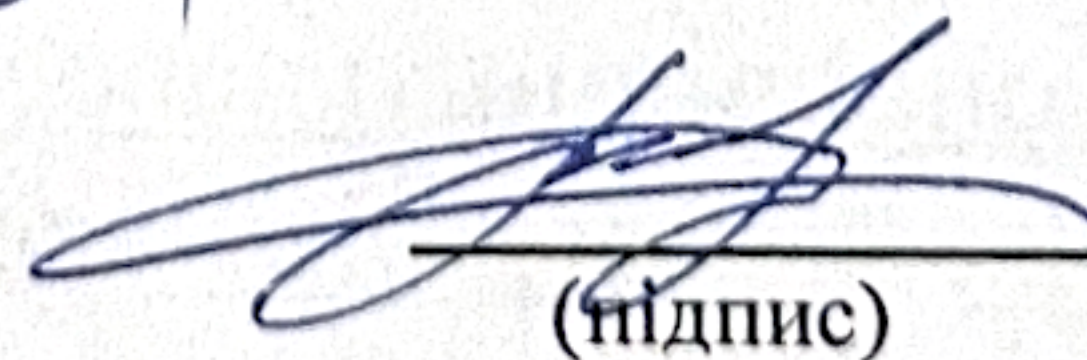
Здобувач освіти


(підпис)

Тимофій ПАЛЯНИЦЯ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Вадим БОМБ

(прізвище та ініціали)

Анотація

Паляниця Т.О. «Модернізація електропривода водопровідного насосного комплексу». Бакалаврська кваліфікаційна робота. Вінниця : ВНТУ, 2025.— 91 с. Бібліогр. :28. Іл. :19. Табл. :25.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі здійснено розробку електропривода водопровідного комплексу.

Вибрано гідроагрегат для насосного комплексу. Було здійснено вибір силового обладнання та елементів системи регулювання гідротурбіни для системи керування водопровідним комплексом.

Розроблена система електропостачання насосної установки з системою автоматичного регулювання продуктивності.

Розглянуто питання охорони праці.

Ключові слова: гідротурбіна, насосний комплекс, система автоматичного регулювання продуктивності.

The summary

Palyanytsia T.O. Modernization of electric drive for water pumping set. Bachelor thesis. Vinnytsia: VNTU, 2025.– 91 p. Bibliogr. :28. Ill. :19. Table :25.

In the bachelor's qualification work, the development of an electric drive for a leading water complex was carried out.

A hydraulic unit was selected for the pumping complex. The selection of power equipment and elements of the turbine control system for the hydraulic control systems of the water supply complex was carried out.

A power supply system for a pumping unit with an automatic performance control system was developed.

The issue of labor protection was considered.

Keywords: hydroturbin, pump complex system of automatic adjustment.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ОПИС ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОПРОВІДНОГО НАСОСНОГО КОМПЛЕКСУ	6
1.1 Режими роботи насосного обладнання.....	6
1.2 Технічні характеристики насосних агрегатів	9
1.3 Характеристика гідромережі	14
1.4 Робота насосів на гідромережу	18
1.5 Методи регулювання параметрів насосних установок	20
1.6 Вимоги до насосного комплексу	20
2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАСОСНИМ КОМПЛЕКСОМ З СИСТЕМОЮ АКТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАСОСНИМ КОМПЛЕКСОМ.....	24
2.1 Опис структурної схеми системи управління.....	24
3 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАСОСНИМ КОМПЛЕКСОМ	41
3.1 Вибір силового обладнання.....	41
3.2 Вибір елементів системи регулювання гідротурбіни	43
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	74
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту	75
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	75
4.1.2 Електробезпека	78
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	79
4.2.1 Мікроклімат.....	79
4.2.2 Склад повітря робочої зони	80
4.2.3 Виробниче освітлення.....	81
4.2.4 Виробничий шум	82
4.2.5 Виробнича вібрація	83

	4
4.3 Пожежна безпека	84
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89
Додаток А	92
Додаток Б.....	96
Додаток В	97
Додаток Д	98

ВСТУП

Модернізація електропривода водопровідного насосного комплексу є важливим напрямом підвищення енергоефективності та надійності систем водопостачання. У зв'язку зі зростанням вартості енергоносіїв, зношеністю обладнання та вимогами до автоматизації, оновлення електроприводів дозволяє зменшити енергоспоживання, підвищити стабільність подачі води та знизити експлуатаційні витрати. Така модернізація сприяє сталому розвитку інфраструктури й відповідає сучасним технічним та екологічним вимогам.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення надійності роботи насосної установки.

Режим роботи насосних установок (НУ) потребує постійного коригування через змінний характер споживання води. Це зумовлено технологічними особливостями функціонування підприємств, коливаннями графіків водоспоживання, припливом стічних або кар'єрних вод. У більшості випадків управління насосами зводиться до підтримки стабільного тиску або продуктивності в контрольній точці системи – наприклад, у міських водопровідних мережах, напірних колекторах чи резервуарах.

Для зміни характеристик лопатевих гідромашин застосовуються різні методи регулювання, що дають змогу контролювати напір, витрату, кавітаційний запас тощо. Це можна зробити двома способами:

1. Регулюванням гідромашини – зміна частоти обертання, геометрії або положення робочих елементів.
2. Зміною характеристик трубопровідної системи – дроселюванням потоку або перепуском води між патрубками (байпас).

Найпоширенішим на практиці є регулювання за допомогою засувки на виході з насоса.

1 ОПИС ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОПРОВІДНОГО НАСОСНОГО КОМПЛЕКСУ

Системи міського водопостачання є складними енергетичними об'єктами, що включають насосні установки (НУ), розгалужену трубопровідну мережу, запірно-регулюючу арматуру, контрольно-вимірювальні прилади та споживачів – як житловий сектор, так і промислові підприємства [1]. Режим роботи змінюється з часом через нерівномірне водоспоживання. На практиці параметри насосних агрегатів (НА) часто регулюють енерговитратними способами: дроселюванням, байпасуванням або зміною кількості працюючих насосів. Це знижує ефективність системи, тому виникає необхідність у впровадженні рішень, спрямованих на підвищення економічності та енергоефективності роботи насосних комплексів [2].

1.1 Режим роботи насосного обладнання

Забір води здійснюється з 14-ти метрової глибини, двома сифонними трубопроводами діаметром 1200 мм, через які вода надходить на дві насосні станції (НС) I-го підйому водозабору. Проектна потужність кожної з них – 190 000 м³/добу.

Технологічний процес забору води відбувається таким чином. На самій вищій точці греблі ГЕС знаходиться вакуумний насос, який качає воду з річки. По двом сифонних трубопроводах вода самопливом надходить в камеру мікрофільтрів, де відбувається її попередня очистка. Через відкриту засувку на всмоктуючому трубопроводі вода заповнює робочу камеру насоса і трубопровід до закритої засувки в напірному патрубку агрегату. Після чого здійснюється процес запуску НА. Коли швидкість двигуна досягне номінальної, поступово відкривається засувка на напірному трубопроводі і насос виводиться на номінальний режим роботи.

Далі вода по двох водоводах діаметром 1100 мм і 1200 мм кожен подається на водоочисну станцію (ВОС) для проведення необхідної очищення та транспортування в резервуари чистої води ємністю 10 000 м³ кожен. НС II -го підйому, розташована на території ВОС, здійснює подачу очищеної води споживачам. Проектна потужність НС дорівнює 150000 м³/добу. Через низьку якість вихідної води ВОС пропускає близько 120000 м³/добу.

Технологічна схема НС II -го підйому м. Вінниці (рисунок 1.1) складається з групи із 12 паралельно включених агрегатів, діапазони продуктивностей яких лежать в межах 1500-3200 м³/с.

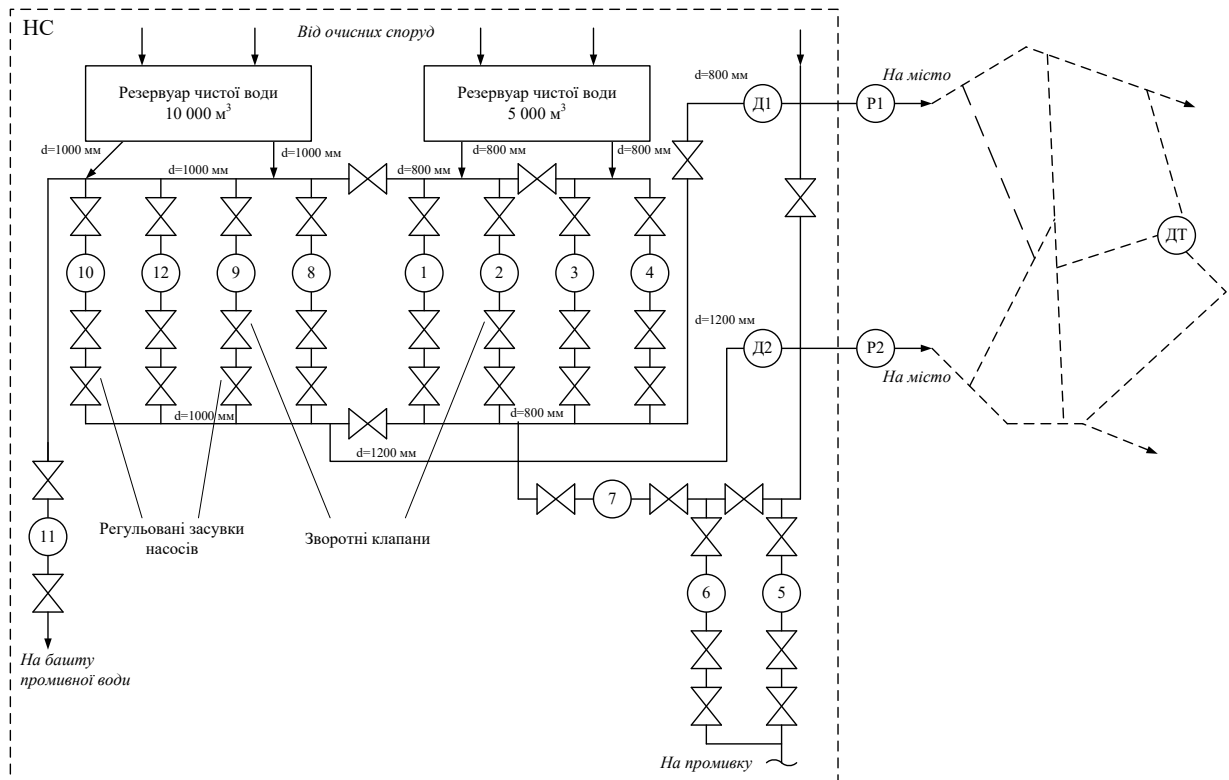


Рисунок 1.1 – Технологічна схема НС II -го підйому

Витрата води в системі значно залежить від часу доби та пори року, тому подача коливається в широких межах. У штатному режимі постійно працює насосний агрегат №12 із потужністю 800 кВт та продуктивністю 3200

м³/год. У періоди пікового споживання до роботи додатково залучається насос №1 з продуктивністю 1500 м³/год і потужністю 500 кВт. Решта насосного обладнання перебуває в резерві або використовується для інших технологічних потреб.

Необхідне регулювання подачі води здійснюється шляхом дроселювання потоку за допомогою засувки, встановлених на напірних патрубках насосних агрегатів. Такий спосіб регулювання супроводжується значними втратами напору та непродуктивним споживанням електроенергії. У деяких випадках для обмеження витрати додатково прикривають засувки на вихідних трубопроводах, переважно на основній лінії.

Залежно від поточного рівня споживання води в мережі, насосні агрегати вмикаються у різних комбінаціях:

- при витраті 4800–5500 м³/год одночасно працюють насоси №1 та №12;
- при витраті 5500–5800 м³/год до роботи додається насос №7 – працюють №1, №12 та №7;
- при витраті близько 6000 м³/год до попередніх агрегатів підключається ще насос №2, отже працюють №1, №12, №7 та №2.

На рисунку 1.2 подано графічне зображення змін тиску та витрати води протягом доби в окремих точках насосної станції другого підйому, а також у контрольній точці трубопроводної мережі. Аналіз діаграми (зокрема кривої 5) свідчить, що максимальні обсяги водоспоживання припадають на часовий інтервал з 7:00 до 22:00. У цей період для забезпечення необхідної подачі задіяні насоси №1 та №12.

У нічний час, з 00:00 до 05:00, об'єм споживання суттєво скорочується, тому насос №1 відключається. Наприклад, при зафіксованій витраті 5400 м³/год у роботі залишаються лише насоси №1 і №12.

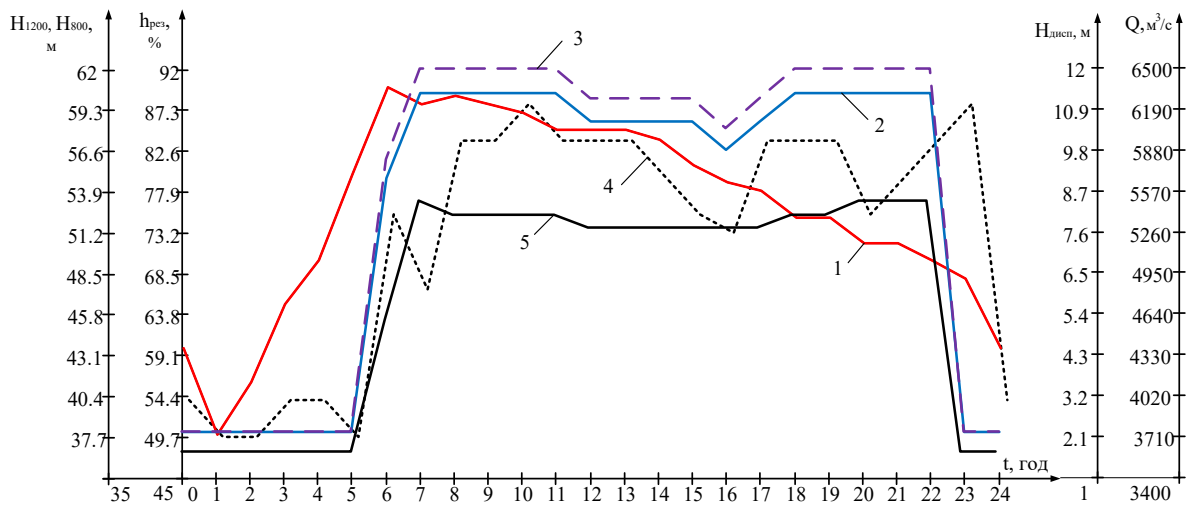


Рисунок 1.2 – Графіки зміни напору і витрати в системі

водопостачання м. Вінниці при чому: 1 – зміна рівня води в резервуарі на НС II-го підйому; 2, 3 – зміна напору в напірних трубопроводах діаметром 1200 мм та 800 мм відповідно; 4 – зміна напору в контрольній точці трубопровідної мережі на НС III-го підйому; 5 – зміна продуктивності насосної станції II-го підйому протягом доби

У контрольній точці трубопровідної системи (диспетчерський пункт) спостерігаються помітні коливання тиску, тоді як на виході з насосної станції другого підйому — у магістральних трубопроводах діаметром 1200 мм і 800 мм — зміни тиску відбуваються більш поступово та стабільно.

1.2 Технічні характеристики насосних агрегатів

Під час підбору електродвигунів для насосного обладнання слід враховувати такі ключові параметри [3]:

- тип і призначення приводного механізму;
- максимальна потужність, що передається на вал насоса (враховуючи, що насос працює у тривалому режимі зі стабільним навантаженням);

- обертову швидкість приводного вала;
- метод з'єднання валів електродвигуна та насоса;
- пусковий момент опору на валу;
- кількість пусків або вмикань приводу за визначений проміжок часу;
- умови навколишнього середовища, в яких експлуатується обладнання.

У водопровідних насосних станціях зазвичай використовуються відцентрові насоси. У більшості випадків для їх приводу застосовують трифазні електродвигуни змінного струму. Визначення необхідної потужності електродвигуна насоса здійснюється відповідно до методики, викладеної в джерелі [3].

$$P = k_3 \cdot \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{102 \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{пер}}} \quad (1.1)$$

де Q – кількість води, що нагнітається, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – повний напір, м ;

γ – питома вага рідини, $\text{кгс}/\text{м}^3$;

η_n – ККД насоса;

$\eta_{\text{пер}}$ – ККД передачі;

k_3 – коефіцієнт запасу, що враховує можливі перевантаження (зміни напору). Для двигунів потужністю більше 50 кВт $k_3 = 1,05 \dots 1,1$.

Для приводу малопотужних (до 400 кВт) відцентрових та осьових насосів зазвичай застосовуються асинхронні електродвигуни. Залежно від конструкції ротора розрізняють двигуни з короткозамкненим та фазним ротором.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором є найбільш доцільним вибором для приводів насосів такої потужності. Вони мають просту конструкцію, потребують мінімального технічного обслуговування та

є економічно вигідними — їхня вартість помітно нижча порівняно з іншими типами електроприводів.

Асинхронні двигуни з фазним ротором застосовуються рідко, оскільки мають складнішу конструкцію, вищу вартість (на 40–50% дорожчі), а також виготовляються виключно в горизонтальному виконанні.

Пусковий момент короткозамкнених асинхронних двигунів зазвичай становить від 1 до 1,9 номінального моменту ($M_{\text{ном}}$) залежно від потужності агрегату.

Для приводу потужних насосних агрегатів, які працюють з підвищеною тривалістю у безперервному режимі, доцільно використовувати синхронні електродвигуни змінного струму. У порівнянні з асинхронними, вони мають низку переваг: вищий коефіцієнт корисної дії, покращений коефіцієнт потужності та підвищену стійкість до коливань напруги в електромережі.

Запуск синхронного двигуна зазвичай виконується в асинхронному режимі. Для цього в полюсні башмаки ротора монтують короткозамкнуту пускову обмотку. Під час подачі напруги на обмотку статора обмотка збудження залишається розімкнутою. Завдяки пусковій обмотці двигун починає працювати в асинхронному режимі, досягаючи швидкості, близької до синхронної. Лише після цього подається струм у збуджувальну обмотку, що формує синхронізуючий момент і втягує ротор у синхронізм, змушуючи його обертатися з точною синхронною швидкістю.

У сучасних водопровідних насосних установках (НУ) найширше застосування мають лопатеві насоси, зокрема відцентрового та осьового типу. При наявності кількох насосних агрегатів, їхні напірні та всмоктувальні лінії об'єднуються у відповідні колектори. У конструкції насосних станцій обов'язково передбачається резервне насосне обладнання, яке підбирається залежно від кількості основних агрегатів і рівня надійності системи.

Відцентрові насоси поділяються на одноступеневі (з одним робочим колесом) та багатоступеневі (з кількома робочими колесами). У

багатоступеневій конфігурації рідина спочатку надходить до центру першого колеса через всмоктувальний патрубок, потім подається від периферії одного колеса до центру наступного, поступово збільшуючи тиск на кожному ступені. Кількість робочих коліс у таких насосах може сягати 10–16 одиниць.

З конструктивної точки зору, залежно від орієнтації валу, насоси класифікуються на горизонтальні та вертикальні [4].

До основних технічних характеристик насосного обладнання належать:

- об'ємна подача (Q , $\text{м}^3/\text{с}$) – об'єм рідини, який насос подає за одиницю часу;
- напір насоса (H , м) – різниця питомих енергій рідини на виході (в напірному патрубку) і на вході (у всмоктуючому патрубку), що визначає здатність агрегату піднімати рідину на певну висоту та долати втрати на тертя в системі трубопроводів;
- вакуумметрична висота всмоктування ($H_{\text{вак}}$, м) – різниця між атмосферним тиском над вільною поверхнею рідини у всмоктуючій ємності та абсолютним тиском у всмоктуючому патрубку, необхідна для підняття рідини до центру робочого колеса. Це значення є індивідуальним для кожної насосної моделі.

Під час побудови характеристик насосів незалежною змінною, як правило, приймається подача Q , оскільки вона безпосередньо пов'язана з витратою рідини у трубопровідній системі, в якій працює насосна установка.

Усі інші гідравлічні параметри — напір H , споживана потужність N , коефіцієнт корисної дії η , а також допустима вакуумметрична висота всмоктування $H_{\text{вак}}$ — змінюються залежно від величини подачі.

Таким чином, експлуатаційні характеристики насоса — це залежності величин H , N , η та $H_{\text{вак}}$ від подачі Q при фіксованій частоті обертання n і визначеному діаметрі робочого колеса D .

Напірно-видаткова характеристика насоса:

$$H = H_0 \cdot v^2 - R_b \cdot Q^2. \quad (1.2)$$

де H_0 – напір, що розвивається насосом при нульовій подачі, м;

v – відносна швидкість обертання робочого колеса насоса:

$$v = \omega / \omega_H,$$

де ω_H – номінальна швидкість обертання насоса, рад/с;

R_b – внутрішній опір насоса, який визначається за паспортними характеристиками турбомашини, $\text{с}^2/\text{м}^5$;

Q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$.

Потужність, яка споживається насосом:

$$N = \frac{N_{\pi}}{\eta} = \frac{QH\rho g}{\eta}, \quad (1.3)$$

де N_{π} – корисна потужність насоса;

η – повний ККД насоса;

ρ – щільність рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Технічні характеристики насосного обладнання (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Обладнання насосної станції II-го підйому

Тип насоса	Подача, $\text{м}^3/\text{год}$	Напір, м вод. ст	Потужність двигуна, кВт	Частота обертання, об/хв
Насос 1 14Д-6а	1500	90	500	1480

Продовження таблиці 1.1 – Обладнання насосної станції II-го підйому

Насос 2, 3, 4 Д1250-125	1250	125	630	1485
Насос 7 3В200×2	400-500	95	200	1470
Насос 8, 9, 10 Д2000-100	2000	100	800	980
Насос 12 Д3200-75	3200	75	800	980

1.3 Характеристика гідромережі

Комунікаційна мережа — це складна та розгалужена система трубопроводів значної довжини, яка характеризується наявністю протитиску (що може досягати до 40 % від номінального напору) і значним гідродинамічним опором. Насосна станція (НС) та трубопровідна система, на яку вона подає воду, утворюють єдину гідравлічну транспортну систему, тому їхню роботу слід розглядати комплексно.

Фактичні експлуатаційні параметри насосного агрегату (НА) можна визначити лише за умови одночасного аналізу його характеристики та параметрів мережі, до якої він підключений. Створюваний насосом напір складається з двох основних компонентів: статичного напору (протитиску), що забезпечує підйом рідини на необхідну висоту (геодезичний напір), та динамічного напору, потрібного для подолання опору в трубопроводах. Характеристику трубопровідної системи (рисунок 1.3) можна виразити рівнянням:

$$H = H_{\text{ст}} + R_c \cdot Q^2, \quad (1.4)$$

де R_c – гідродинамічний опір мережі, який залежить від протяжності мережі, величини поперечного перерізу трубопроводу, шорсткості стінок і наявності місцевих опорів (колін, зворотних клапанів, засувок), в'язкості середовища, що транспортується, $[\text{сек}^2/\text{м}^5]$.

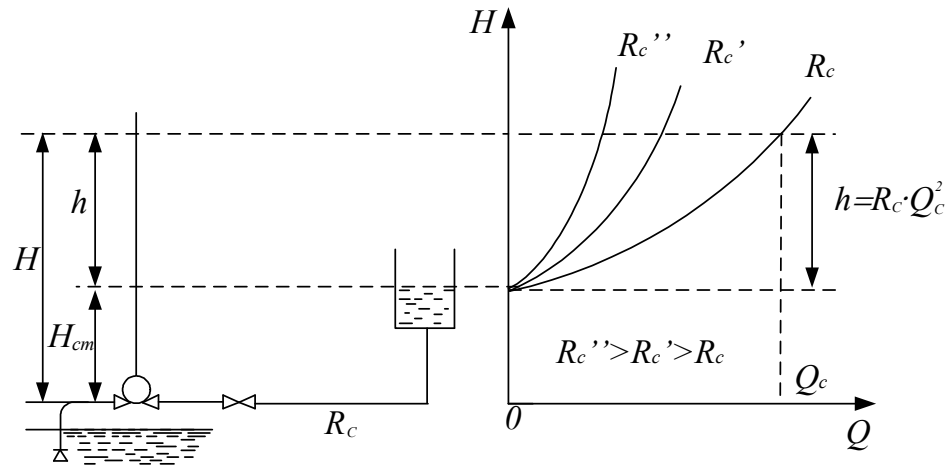


Рисунок 1.3 – Схема трубопроводної мережі та її характеристика

Рівняння характеристики мережі за відсутності протитиску:

$$H = R_c \cdot Q^2.$$

Розрахунок водопровідної мережі полягає у визначенні напірних втрат на кожному відрізку мережі при заданих значеннях подачі та довжини цих ділянок. Виділяють два основних типи втрат напору: втрати, що виникають на протязі трубопроводу, та втрати, пов'язані з подоланням місцевих опорів.

$$h = h_{\text{дл}} + h_{\text{м}}. \quad (1.5)$$

Формула А.Дарсі-Ю.Вейсбаха для визначення втрат напору по довжині трубопроводу [5]:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}. \quad (1.6)$$

де l – довжина труби, м;

d – діаметр труби,

v – швидкість води в трубі, м/с ($v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}$);

λ – коефіцієнт, який враховує тертя рідини об стінки труби і залежить від матеріалу і стану труби.

Приймається $\lambda = 0,02 \dots 0,03$, $g = 9,81$ м/с².

Втрати напору на подолання місцевих опорів:

$$h_M = \sum \xi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (1.7)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору.

Для конкретної ділянки труби коефіцієнт місцевого опору ξ залежить від типу опору, числа Рейнольдса і визначається за довідниковими таблицями. При розрахунках кожен місцевий опір можна замінити еквівалентною довжиною труби, втрати напору на якій дорівнюють втратам напору на цьому опорі. Позначивши відповідний приведений коефіцієнт як $h = \sum \xi \cdot k_1$, виконаємо заміну. Після відповідних перетворень отримаємо наступний вираз:

$$h = \left(k_1 + \frac{\lambda}{d}\right) \cdot \frac{8 \cdot l \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} = S \cdot l \cdot Q^2, \quad (1.8)$$

де S – питомий опір довжиною 1 м при одиничній подачі, який визначається за табличним даними:

$$S = \left(k_1 + \frac{\lambda}{d}\right) \cdot \frac{8}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g}.$$

Для побудови характеристики мережі немає необхідності обчислювати втрати напору для всіх можливих значень витрат рідини. Достатньо

визначити їх у 4–5 точках, що охоплюють вузький діапазон витрат, очікуваний в процесі експлуатації трубопроводу.

Величина статичного напору в мережі, яку складно виміряти безпосередньо, розраховується на основі параметрів роботи насосних агрегатів із використанням аналітичної формули:

$$H_{\text{ст}} = \frac{H_1 - H_2 \frac{Q_1^2}{Q_2^2}}{1 - \frac{Q_1^2}{Q_2^2}}, \quad (1.9)$$

де H_1, H_2, Q_1, Q_2 – натиск і подача води в 2 -х різних точках характеристики трубопроводу.

Оскільки трубопроводи діаметром 800 мм і 1200 мм на насосній станції II-го підйому з'єднані паралельно, величина протитиску для них однакова. Середнє значення протитиску становить 25,3 м. Для побудови характеристики трубопроводів другу точку визначають як середню на основі експлуатаційних даних мережі: для трубопроводу діаметром 1200 мм при напорі 50 м подача води становить $Q_{1200} = 3135 \text{ м}^3/\text{год}$ ($0,871 \text{ м}^3/\text{с}$), а для трубопроводу діаметром 800 мм при напорі 50 м витрата дорівнює $Q_{800} = 1408 \text{ м}^3/\text{год}$ ($0,391 \text{ м}^3/\text{с}$).

Гідродинамічні опори трубопроводів:

$$R_{\text{с1200}} = \frac{H_{1200} - H_{\text{ст}}}{Q_{1200}^2}, \quad (1.10)$$

$$R_{\text{с1200}} = \frac{50 - 25.3}{0.871^2} = 32.56 \text{ (с}^2/\text{м}^5\text{)},$$

$$R_{c800} = \frac{H_{800} - H_{ct}}{Q_{800}^2}, \quad (1.11)$$

$$R_{c800} = \frac{50 - 25.3}{0.391^2} = 161.56 \text{ (с}^2/\text{м}^5\text{)}.$$

Характеристики обох трубопроводів наведені на рисунку 1.4.

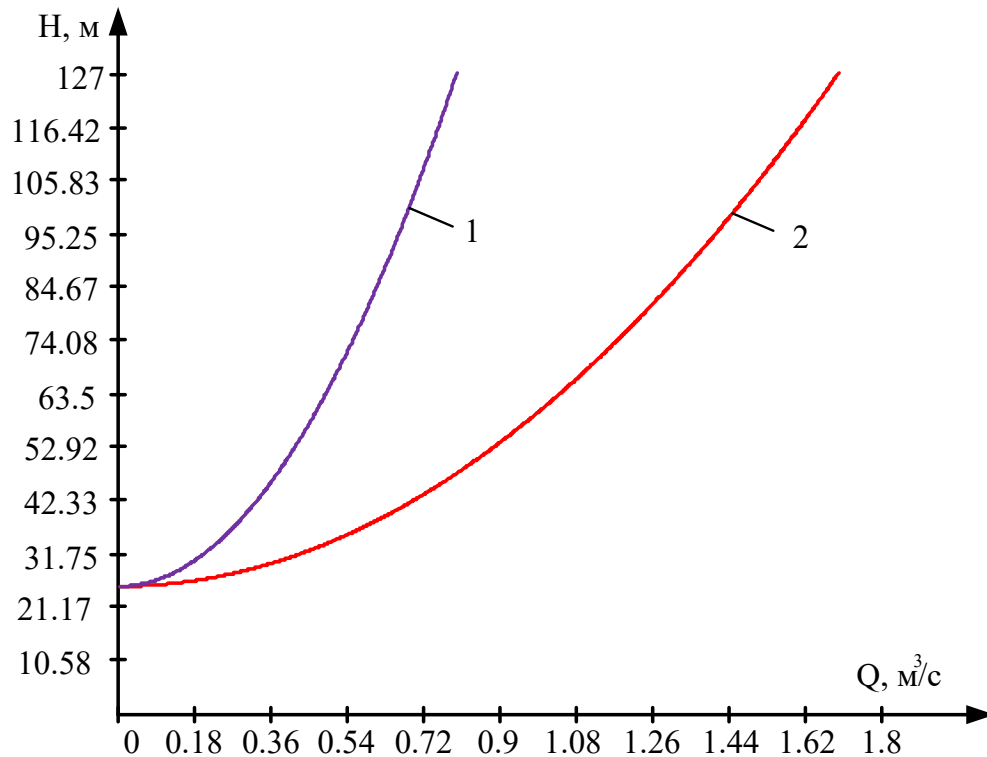


Рисунок 1.4 – H-Q характеристики трубопроводів НС II-го підйому

На рисунку 1.4: 1 – H-Q характеристика трубопроводу діаметром 800 мм; 2 – H-Q характеристика трубопроводу діаметром 1200 мм.

1.4 Робота насосів на гідромережу

Для аналізу режимів функціонування насосної станції з паралельно працюючими насосними агрегатами застосовують їхні сумарні характеристики [4]. У випадку паралельної роботи насосів подача води

здійснюється в один і той самий напірний трубопровід або спільну систему труб.

Сумарна характеристика двох насосів, що працюють паралельно (наприклад, агрегатів №1 і №12 – рисунок 1.5), визначається шляхом додавання подач (по осі абсцис) відповідних індивідуальних характеристик насосів при однаковому значенні напору (ордината). Таким чином, на основі вищевикладеного і враховуючи вираз (1.1), гідравлічний опір трубопровідної системи розглядуваної насосної станції визначається як:

$$R_c = \frac{H_{1200} - H_{ст}}{(Q_{1200} + Q_{800})^2} = 15.5 \text{ (с}^2/\text{м}^5\text{)}.$$

На рисунок 1.5 приведена спільна робота насосів 1 і 12 на загальну гідравлічну мережу.

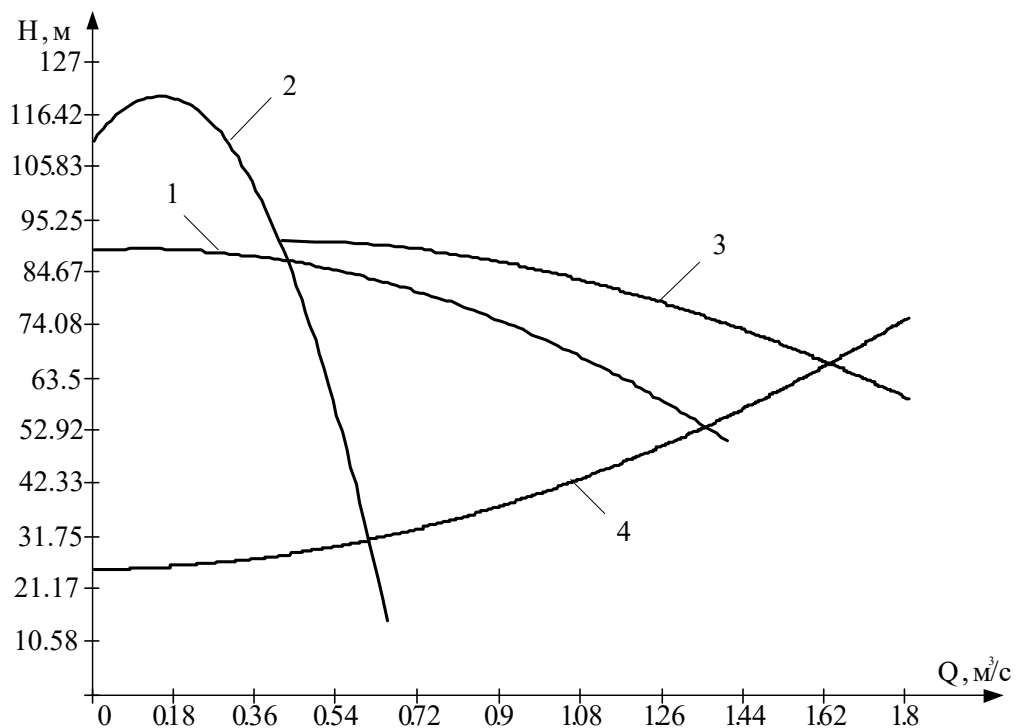


Рисунок 1.5 – Робота насосної установки з двома паралельно включеними агрегатами на мережу з постійними параметрами

На рисунку 1.5: 1, 2 – напірно-витратні характеристики насосів 12 і 1;
3 – сумарна напірно-видаткова характеристика насосів; 4 – сумарна характеристика мережі з протитиском

1.5 Методи регулювання параметрів насосних установок

Режими функціонування насосної установки змінюються відповідно до коливань у водоспоживанні. Останнє обумовлюється широким спектром незалежних чинників, таких як графік роботи міських підприємств і установ, погодні та кліматичні умови тощо. Зазвичай водоспоживання аналізується за допомогою добових і тижневих графіків. Часто виникає необхідність цілеспрямовано регулювати подачу та напір насосних агрегатів відповідно до таких графіків. На рисунку Б.1 (додаток Б) наведено часові діаграми середньорічної та сезонної добової зміни витрати води у системі водопостачання.

Існують такі методи регулювання параметрів насосної установки:

- 1) дроселюванням;
- 2) зміною частоти обертання робочого колеса насоса;
- 3) байпасуванням (перепуском);
- 4) зміною кута установки лопатей робочого колеса насоса;
- 5) шляхом зміни числа працюючих насосів (регулювання ступенями);
- 6) зміною характеристики насоса обточуванням його робочого колеса.

1.6 Вимоги до насосного комплексу

Сучасні насосні установки водопостачання — це комплексні системи, до складу яких входять один або кілька насосних агрегатів, що працюють паралельно на спільний колектор, а також система трубопроводів, запірно-

регулююча арматура, контрольно-вимірювальні прилади, пристрої управління та захисту. Споруда, в межах якої розміщені такі установки разом із допоміжними системами, виробничими та побутовими приміщеннями, утворює насосну станцію (НС).

Насосні агрегати, які застосовуються в системах водопостачання, водовідведення, шахтному водовідливанні, зазвичай мають високу встановлену потужність – від 75 кВт до десятків мегават (30-40 МВт). Для їхнього приводу переважно використовують високовольтні асинхронні короткозамкнені або синхронні електродвигуни змінного струму. Асинхронні двигуни з фазним ротором використовуються рідко. Потужність електродвигунів до 350 кВт передбачає напругу 380–660 В, для більш потужних агрегатів – 4-10 кВ.

Більшість насосних агрегатів функціонують у нерегульованих або недовантажених режимах, демонструючи низькі значення коефіцієнта корисної дії (30-60 %) і коефіцієнта завантаження (до 50 %). Це призводить до значних енергетичних втрат і зумовлює потребу в зниженні встановленої потужності приводів. Аналіз споживання енергії насосними станціями свідчить, що основні агрегати, які забезпечують перекачування рідини, споживають 75-95 % усієї електроенергії, і ця частка зростає зі збільшенням загальної потужності НС. Наприклад, у великих установках (800-1000 кВт) на ці агрегати припадає понад 90-95 % споживаної енергії. У невеликих станціях (до 160 кВт) ця частка зменшується до 75 %, а в окремих випадках – до 50%. Опалення будівель НС зазвичай споживає 5–10 %, допоміжні системи – 2–3 %, вентиляція та освітлення – по 1-2 %. Частина енергії йде на живлення систем автоматики, сигналізації, управління та захисту.

Таким чином, насосні станції є енергоємними технологічними об'єктами з характерними особливостями: значними коливаннями робочих параметрів, зумовленими змінним графіком споживання води; можливістю одночасної роботи кількох насосів, з'єднаних у паралельну або послідовну

схему; великою протяжністю та розгалуженістю трубопровідної мережі; специфічними властивостями робочого середовища (щільність, в'язкість, неоднорідність).

Через значну тривалість роботи та високі витрати енергії, насосні агрегати із фіксованою швидкістю обертання характеризуються обмеженими можливостями регулювання. Як правило, у міських водопровідних системах насосні установки групового типу працюють на спільну гідромережу з протитиском, де статичний напір перевищує 40% загального напору, створюваного насосами.

Регулювання подачі води у таких системах часто здійснюється малоефективними способами – шляхом дроселювання засувками або перемиканням кількості працюючих насосів, що призводить до зниження ККД установки і збільшення непродуктивних енерговитрат (до 30-40 %). Часте включення/вимкнення насосів також провокує гідравлічні удари, які можуть спричинити аварії чи збої в роботі системи.

У цьому контексті ефективним рішенням є впровадження систем регульованого електроприводу (РЕП), які дають змогу оптимізувати подачу води й знизити споживання енергії шляхом плавного регулювання напору та продуктивності. Проте їхнє застосування має низку особливостей:

- більшість сучасних установок працюють паралельно чи послідовно в спільній системі з постійним протитиском;
- найдоцільніше оснащувати регульованим приводом лише один із насосів, оскільки реальний діапазон зміни частоти обертання зазвичай не перевищує 7-10 % від номіналу, а при збільшенні кількості одночасно працюючих агрегатів цей діапазон ще більше зменшується – до 3 %, що обмежує ефективність використання РЕП;
- потужність частотного перетворювача або тиристорного регулятора має відповідати повній потужності насоса, що суттєво збільшує вартість обладнання.

Інші методи регулювання, як правило, менш ефективні, затратні та малопридатні для оптимізації енергетичних режимів.

Альтернативне рішення — активне регулювання подачі за допомогою гідротурбіни, встановленої на обвідному трубопроводі паралельно насосу або регулювальній арматурі. В цьому випадку надлишкова енергія потоку перетворюється в електричну за допомогою генератора й повертається в енергомережу. Це дозволяє частково компенсувати енерговтрати й підвищити загальну ефективність системи.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАСОСНИМ КОМПЛЕКСОМ З СИСТЕМОЮ АКТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАСОСНИМ КОМПЛЕКСОМ

2.1 Опис структурної схеми системи управління

Структурна схема системи керування насосним комплексом подана на рисунку В.2 (додаток В). Вона охоплює два насосні агрегати (НА1 і НА2), з'єднані паралельно, які приводяться в дію асинхронними електродвигунами АД1 та АД2. У напірних патрубках насосів встановлено регульовальні засувки Z1 і Z2, у напірному колекторі — засувка Z3, а на обвідному трубопроводі — засувки Z4 і Z5. Кожна з них обладнана виконавчим механізмом (ІМ1–ІМ5). Стан засувки Z3–Z5 контролюється відповідними датчиками положення (ДП1–ДП5), а за рівнем тиску стежать датчики Н1 і Н2. Крім того, встановлені витратоміри: Q1 — на виході насосного комплексу, Q2 — у споживчій гідромережі.

У контурі трубопровідної системи, паралельно засувці Z3, розміщена поворотнолопатна гідротурбіна (ГТ), яка виконує функцію активного гідравлічного опору. Саме через неї реалізується активне керування подачею насосної станції. Датчики Н1 і Н2, розташовані до засувки Z4 і після засувки Z5, фіксують тиск на вході та виході гідротурбіни відповідно. При цьому показники з датчика Н2 також відображають тиск на виході всього насосного комплексу.

Управління витратою станції та потужністю гідротурбіни відповідно до споживчого навантаження здійснюється за допомогою регулятора потужності (РМ), який є комплексом розподільчих та керуючих елементів — золотників, маслопроводів, сервомоторів тощо. Залежно від типу гідротурбіни, застосовуються електрогідравлічні регулятори (ЕДР) двох основних модифікацій:

- для радіально-осьових гідротурбін з одним регулюючим органом — напрямним апаратом;
- для поворотнолопатних турбін, які мають два регулюючі органи — напрямний апарат та механізм повороту лопатей робочого колеса.

Обидві модифікації доступні у різних типорозмірах, які підбираються залежно від об'єму сервомоторів, і мають відповідні розміри головних золотників для керування ними. Направляючий апарат, розміщений на вході до гідротурбіни, відповідає за регулювання її продуктивності, а отже — і витрати води на виході насосного комплексу.

Направляючий апарат (НА) складається з верхнього та нижнього кілець, в яких розміщені підшипники для опори цапф лопаток; системи лопаток, рівномірно розташованих по колу перед входом у робоче колесо, а також механізму їх повороту. Зміна положення лопаток здійснюється за допомогою сервомоторів, що обертають регулювальне кільце. Це кільце передає обертальний рух через сержки та важелі, які з'єднані з верхніми цапфами лопаток.

Схематичне зображення механізму повороту направляючого апарату представлено на рисунку 2.1 (в закритому – а, та відкритому – б станах), де використано наступні позначення: 1 – важелі; 2 – сержки; 3 – регулювальне кільце.

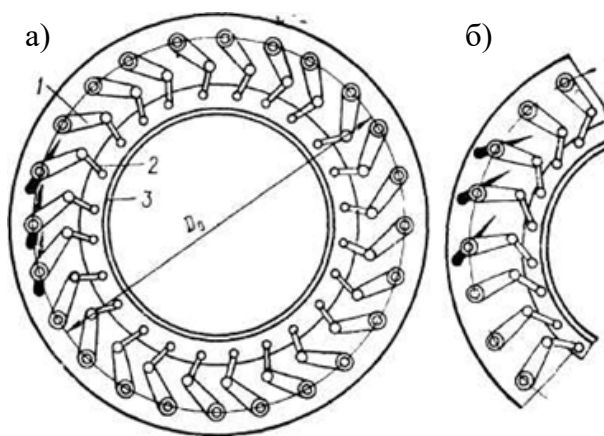


Рисунок 2.1 – Схема механізму повороту направляючого апарату

Типи напрямних апаратів гідротурбін (рисунок 2.2):

- 1) радіальний – осі напрямних лопаток паралельні осі турбіни;
- 2) конічний – осі лопаток розташовані під кутом до осі турбіни;
- 3) осьовий – осі лопаток перпендикулярні до осі турбіни.

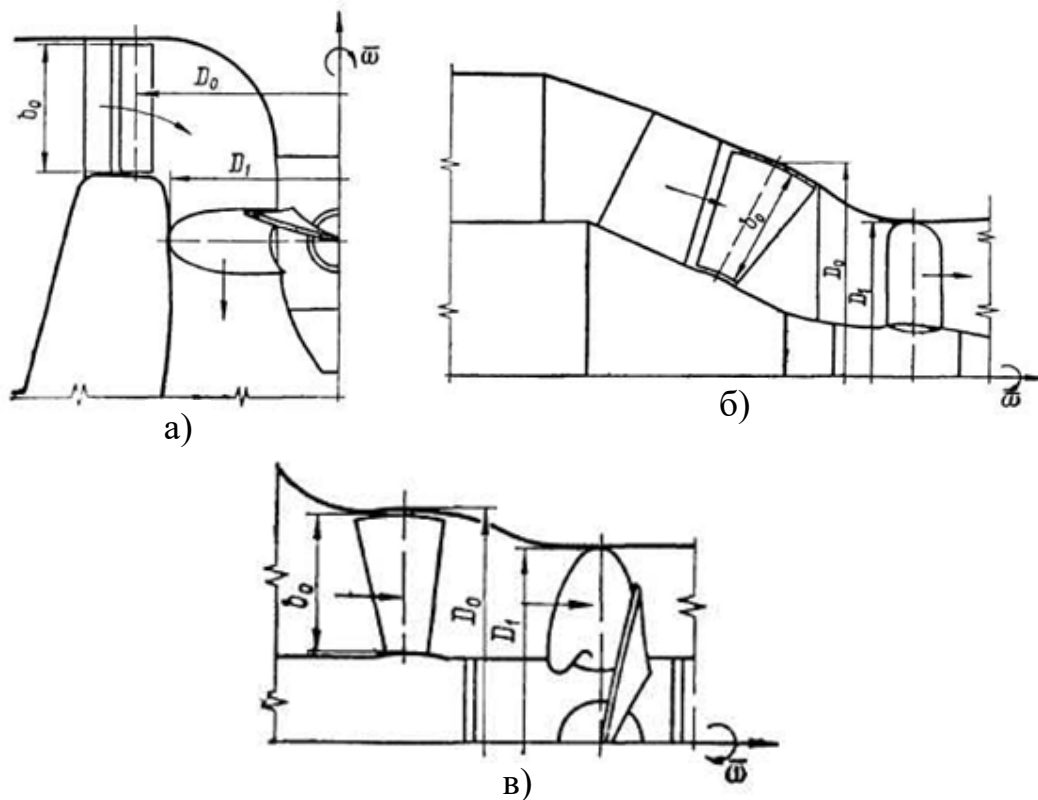


Рисунок 2.2 – Типи напрямних апаратів гідротурбін: а) радіальний; б) конічний; в) осьової

Радіальні (циліндричні) направляючі апарати використовуються в конструкціях радіально-осьових, діагональних і вертикальних осьових поворотнолопатних гідротурбін. Конічні направляючі апарати застосовуються в капсульних, діагональних і вертикальних осьових турбінах. Для прямоточних гідротурбін характерним є використання осьових направляючих апаратів.

У системах регулювання потужності гідротурбін управління регулюючими органами здійснюється за допомогою двох типів сервомоторів:

- сервомотори, що керують направляючим апаратом;

– сервомотор, який відповідає за поворот лопаток робочого колеса.

Через необхідність створення значних зусиль для обертання регулювального кільця, сервомотори повинні забезпечувати не лише достатню потужність, але й високу точність та плавність ходу. Цим вимогам найбільш відповідають гідравлічні сервомотори, що зумовлює їх широке застосування в системах автоматичного керування гідротурбінами.

Гідравлічні масляні сервомотори (рисунок 2.3) виконані у вигляді циліндрів, всередині яких розміщені поршні зі штоками. При подачі масла під тиском до циліндра поршень переміщується, передаючи зусилля на регулювальне кільце направляючого апарата. Це, у свою чергу, забезпечує зміну ступеня відкриття апарата, регулюючи потік води через турбіну.

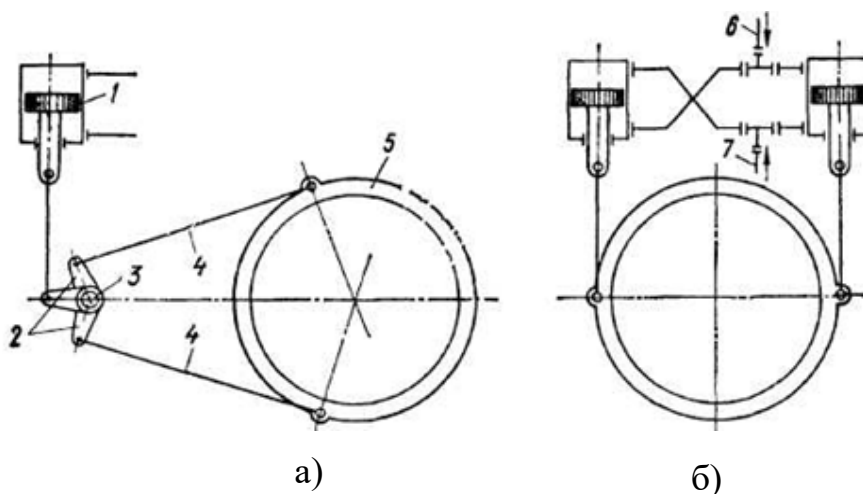


Рисунок 2.3 – Схеми приводів направляючого апарату: а) з одним сервомотором; б) з двома сервомоторами

У гідротурбінах малої потужності зазвичай застосовується схема з одним сервомотором, зображена на рисунку 2.3, а. При переміщенні поршня 1 сервомотора у будь-який бік обертається регулювальний вал 3, на якому закріплений двоплечий важіль 2. Від нього дві тяги 4 передають рух до регулювального кільця 5, змінюючи його положення.

почне переміщуватися вгору, що спричинить обертання лопатей у напрямку зменшення кута їх установки — тобто до закриття.

Основою регулятора потужності (РП) гідротурбіни є мікропроцесорна система управління (СУРП), реалізована на базі програмованих логічних контролерів (PLC) виробництва Microchip, Texas Instruments, Analog Devices, Motorola, Siemens або з використанням модулів MicroPC чи цифрових сигнальних процесорів (DSP) тих самих фірм.

Живлення СУРП здійснюється як від мережі власних потреб, так і від системи постійного оперативного струму. Регулятор комплектується електронною панеллю зі спеціальними перемикачами та кнопками для локального керування турбіною з пульта. Сьогодні розроблено два типи регуляторів із мікропроцесорною СУ:

- ЄДР-2І-1 – на базі інтегральних мікросхем;
- ЄДР-МП – з використанням контролерів, мікропроцесорів та цифрових елементів.

Цифрова мікропроцесорна система управління сучасного регулятора забезпечує:

- регулювання потужності агрегату;
- реалізацію комбінаторної залежності з корекцією по напору;
- підтримку перехідних режимів (пуск, зупинка тощо);
- контроль частоти обертання та положення регулюючих органів турбіни;
- взаємодію з оператором;
- моніторинг стану регулятора.

Керування переміщенням сервомоторів направляючого апарату (НА) і робочого колеса (РК) гідротурбіни відбувається через трипозиційні електромагнітні золотники 31 та 32. Переміщення золотників забезпечується електромагнітами штовхаючого типу (ЕМ1–ЕМ4), які створюють зусилля на їх торцях. При однаковій напрузі електромагніти утримують золотник у

центральному положенні — сервомотор нерухомий. Якщо напруга на одному з електромагнітів змінюється, баланс порушується — золотник зміщується у бік з вищою напругою, приводячи в дію шток сервомотора та поворотне кільце НА. Швидкість переміщення штока регулюється плавною зміною напруги на електромагнітах.

Керуючі сигнали для електромагнітів EM1–EM4 формуються за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП), які перетворюють цифровий сигнал з контролера на аналогову напругу, пропорційну необхідному керуванню. Основні характеристики ЦАП: розрядність, тип інтерфейсу, швидкодія, тип корпусу, вид виходу (струмовий або напруговий) і споживання. Розрядність визначає точність — типовими є 8–12 біт, що відповідає кроку квантування 0,39–0,0244%.

ЦАП поділяються на:

- з паралельним інтерфейсом (байтовим або ширшим — для 16-бітних процесорів);
- з послідовним інтерфейсом (SPI, I²C, 1-Wire тощо).

Паралельні інтерфейси забезпечують більшу швидкість, але вимагають більше висновків мікросхеми. Послідовні — економніші з точки зору апаратної реалізації, однак мають меншу швидкодію.

ЦАП також класифікують за швидкодією:

- низька — до 100 ksps;
- середня — 100–500 ksps;
- висока — понад 500 ksps.

Існують ЦАП зі струмовим виходом (без ОУ) і з напруговим (з вбудованим операційним підсилювачем). В одному корпусі може бути кілька ЦАП із різними типами виходів. Багато сучасних ЦАП мають вбудовані джерела опорної напруги або потребують зовнішніх, а також підтримують кілька варіантів живлення.

У виробничих умовах точність управління залежить від впливу сторонніх чинників. Щоб запобігти спотворенню сигналів та захистити обладнання, аналогові сигнали з виходу ЦАП гальванічно ізолюються та нормалізуються за допомогою модулів МНГР. Далі сигнали посилюються підсилювачами У1–У4 і перетворюються у зусилля, які переміщують золотники 31 і 32 сервомоторів.

Керування регулятором потужності можливе як дистанційно з центрального пульта, так і локально з електронної панелі. Для дистанційного моніторингу передбачено інтерфейс аналогового сигналу 4–20 мА. Регулятори можуть постачатися як у складі турбіни, так і окремо. За потреби, їх комплектують додатковими пристроями.

Для подачі масла під тиском до системи регулювання застосовується маслонапірна установка (МНУ), що складається з маслоповітряного котла, зливного бака й насосів. Котел заповнений на 30–40% маслом, решта — стиснене повітря під тиском 2,5–10 МПа. Насоси перекачують масло по замкненому контуру: зі зливного бака — в котел.

На валу гідротурбіни змонтовано асинхронний генератор (АГ) з короткозамкненим ротором. Частота обертання контролюється за допомогою тахогенератора (ТГ), встановленого на тому ж валу. Зміна частоти або режиму роботи АГ досягається завдяки чотириквadrантному транзисторному перетворювачу енергії (ПЕ), що вмонтований у статорне коло генератора і забезпечує можливість реверсу потужності.

Структурна схема такого ПЕ (рисунк 2.5) включає трифазний діодно-транзисторний міст. У режимі двигуна працює діодний випрямляч, у режимі генератора — інвертор напруги на основі транзисторного моста.

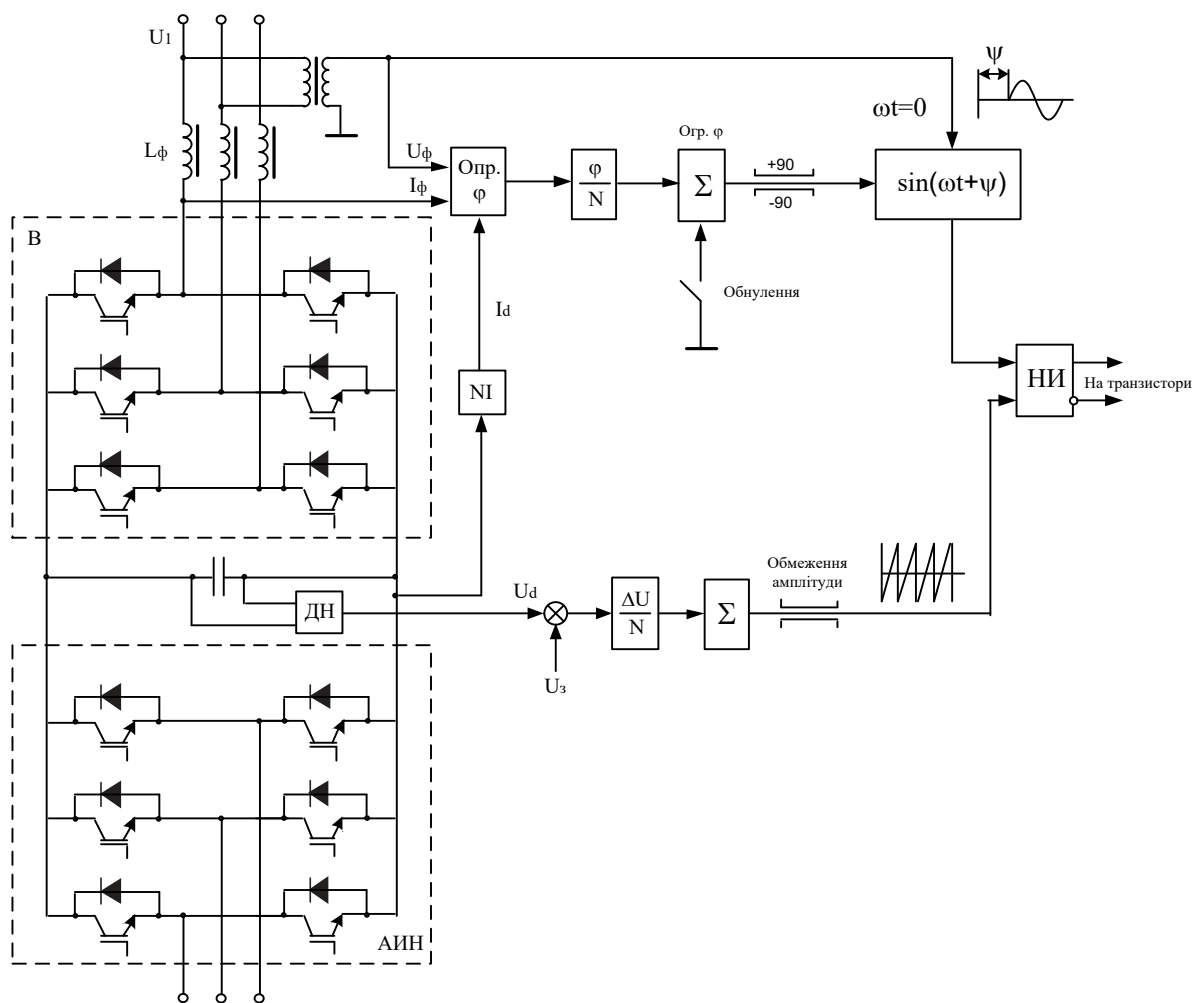


Рисунок 2.5 – Функціональна схема 4-х квадрантного ПЕ

На рисунку 2.5: АІН – автономний інвертор напруги; В – випрямляч.

Одноканальна двоконтурна система регулювання режимів роботи перетворювача енергії (ПЕ) забезпечує стабільне підтримання постійного рівня вихідної напруги випрямляча U_d , а також дає змогу досягти нульового зсуву фаз U_ϕ , ($\phi = 0$) між вхідним струмом і напругою I_ϕ і U_ϕ .

Перший контур регулювання відповідає за компенсацію зсуву фаз. Він містить схему визначення фазового зсуву між напругою та струмом. Відфільтровані сигнали струму I_ϕ і U_ϕ подаються на входи нуль-індикаторів. Далі визначається кут між отриманими строб-сигналами напруги й струму. Виміряне значення фазового зсуву надходить на ПІ-регулятор, який формує

керуючий сигнал для встановлення відповідного зсуву між фазою живильної напруги та фазою модуляційної синусоїди.

Другий контур регулювання контролює рівень постійної напруги на виході випрямляча. Поточне значення U_d порівнюється із заданим опорним значенням. Сигнал відхилення (неузгодженості) подається до ПІ-регулятора другого контуру, який генерує керуючий сигнал для формування необхідної глибини модуляції μ .

$$\mu = \frac{U_i}{U_d},$$

$$0.5 \leq \mu \leq 1.$$

При зміні навантаження (або напруги живлення) для підтримки заданого значення U_d і $\varphi = 0$ змінюється кут ψ і узгоджено з ним глибина модуляції μ .

При цьому, якщо $U_d = \frac{U_i}{\mu - \cos \psi}$, то:

- в випрямному режимі $U_d - U_z > 0$ і $\mu \rightarrow 1$;
 - в рекуперативному режимі: необхідно додатково інвертувати стрібас струму:
- $-90 < \psi < 0$; якщо $\varphi < 0$, то $\psi \rightarrow -90$; якщо $\varphi > 0$, то $\psi \rightarrow 0$.

Залежно від режиму роботи випрямляча, система регулювання перебудовується відповідним чином. Сигнал про зміну режиму може надходити як за полярністю струму, так і від системи управління перетворювачем (СУПЕ). У системі «прив'язки» до мережі живлення щоразу вимірюється тривалість попереднього періоду, після чого коригується значення кутової частоти.

Функціональні можливості, реалізовані в системі управління, дозволяють:

- забезпечувати роботу асинхронної машини в усіх чотирьох квадрантах механічної характеристики;
- здійснювати рекуперацію енергії назад у мережу живлення;
- підтримувати високий коефіцієнт потужності на вході, близький до одиниці;
- стабілізувати середнє значення випрямленої напруги на заданому рівні навіть при зниженні напруги живлення.

Силові модулі мостів мережевого випрямляча та автономного інвертора напруги (АІН) є ідентичними за конструкцією. Для управління чотириквADRантною перетворювальною установкою (ПЕ) застосовується метод асинхронної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що означає: період вихідної напруги інвертора не синхронізується з частотою ШІМ.

Широтно-імпульсне управління силовими ключами (транзисторами) трифазного АІН забезпечує регулювання амплітуди та формування квазісинусоїдальної кривої вихідної напруги за умови стабільної вхідної напруги. При цьому підтримується задане співвідношення *напруга–частота* в усьому діапазоні регулювання.

Алгоритм ШІМ-управління визначає послідовність, фазу та тривалість включення всіх шести транзисторів автономного інвертора, забезпечуючи точне формування вихідного сигналу.

Значення вихідної напруги автономного інвертора напруги (АІН) у кожен момент часу визначається станом транзисторних ключів усіх трьох фаз. Основні принципи керування та роботи трифазного мостового АІН зводяться до наступного:

- два ключі однієї фази АІН працюють поперемінно – кожен з них проводить струм протягом певного інтервалу періоду вихідної частоти;
- одночасне вмикання обох ключів однієї фази неприпустиме, оскільки призводить до короткого замикання джерела постійної напруги U_d ;

- ключі сусідніх фаз керуються аналогічним чином, але зі зсувом у часі (на 120° електричних);
- у кожен момент часу в провідному стані перебувають три ключі – по одному з кожної фази; завдяки цьому всі фази навантаження постійно підключені до полюсів джерела живлення, забезпечуючи наявність кола для проходження струму (через транзистори або їх зворотні діоди).

Стан ключів фази в автономному інверторі напруги (АІН) умовно позначається так:

- $A(B, C) = 1$ – увімкнений верхній ключ фази;
- $A(B, C) = 0$ – увімкнений нижній ключ фази.

У трифазному мостовому АІН можливі вісім комбінацій станів ключів (по одному активному ключу на фазу із шести загалом):

- Шість “робочих” комбінацій: 001, 010, 011, 100, 101, 110 – забезпечують підключення фаз навантаження до джерела постійного струму;
- Дві “нульові” комбінації: 000 і 111 – відключають навантаження від джерела, при цьому всі фази навантаження з'єднані з одним полюсом джерела, і напруга між фазами дорівнює нулю.

Завдання алгоритму ШІМ-управління АІН полягає в наступному:

- Забезпечити регулювання вихідної напруги в повному діапазоні – від нуля до номінального значення;
- Максимально ефективно використовувати напругу джерела постійного струму U_d ;
- Формувати імпульсну (прямокутну) напругу, спектральний склад якої дозволяє отримати майже синусоїдальну криву струму в навантаженні (наприклад, обмотках двигуна);
- Мінімізувати втрати на перемикання в силових ключах, які залежать від частоти ШІМ та кількості перемикань за період.

Векторна ШІМ базується на уявленні напруги як вектора у площині фаз трифазного навантаження. Кожній з шести робочих комбінацій ключів автономного інвертора напруги (АІН) відповідає певне положення вектора в шестикутній діаграмі (див. рис. 4.6). Нульові стани 000 і 111 відповідають нульовому вектору, тобто прикладена напруга до навантаження дорівнює нулю.

ШІМ управління дозволяє, окрім шести фіксованих векторів, формувати безліч проміжних векторів, тобто еквівалентні напруги з різною амплітудою і напрямком. Це досягається шляхом послідовної активації двох сусідніх робочих векторів та нульового вектора протягом одного високочастотного циклу ШІМ (T_s).

Для реалізації потрібного вектора напруги U^* , протягом кожного періоду T_s визначаються відповідні часові інтервали активації:

- T_1 — час дії першого робочого вектора;
- T_2 — час дії другого робочого вектора;
- T_0 — сумарний час дії нульового вектора ($T_0 = T_s - T_1 - T_2$).

Це дозволяє ефективно відтворити будь-який вектор напруги всередині шестикутника, покращити спектральні характеристики вихідного сигналу і зменшити гармоніки.

Для IGBT-транзисторних автономних інверторів напруги (АІН) застосовується алгоритм високочастотного асинхронного ШІМ-управління, який передбачає постійну частоту ШІМ ($T_{\text{ц}} = \text{const}$) в усьому діапазоні зміни вихідної частоти інвертора.

Частота ШІМ зазвичай програмується в межах 0,4...16 кГц, причому рекомендоване значення для більшості навантажень становить 4 кГц. Це дозволяє забезпечити оптимальний компроміс між якістю вихідної напруги, рівнем електромагнітних завад та втратами на перемикання.

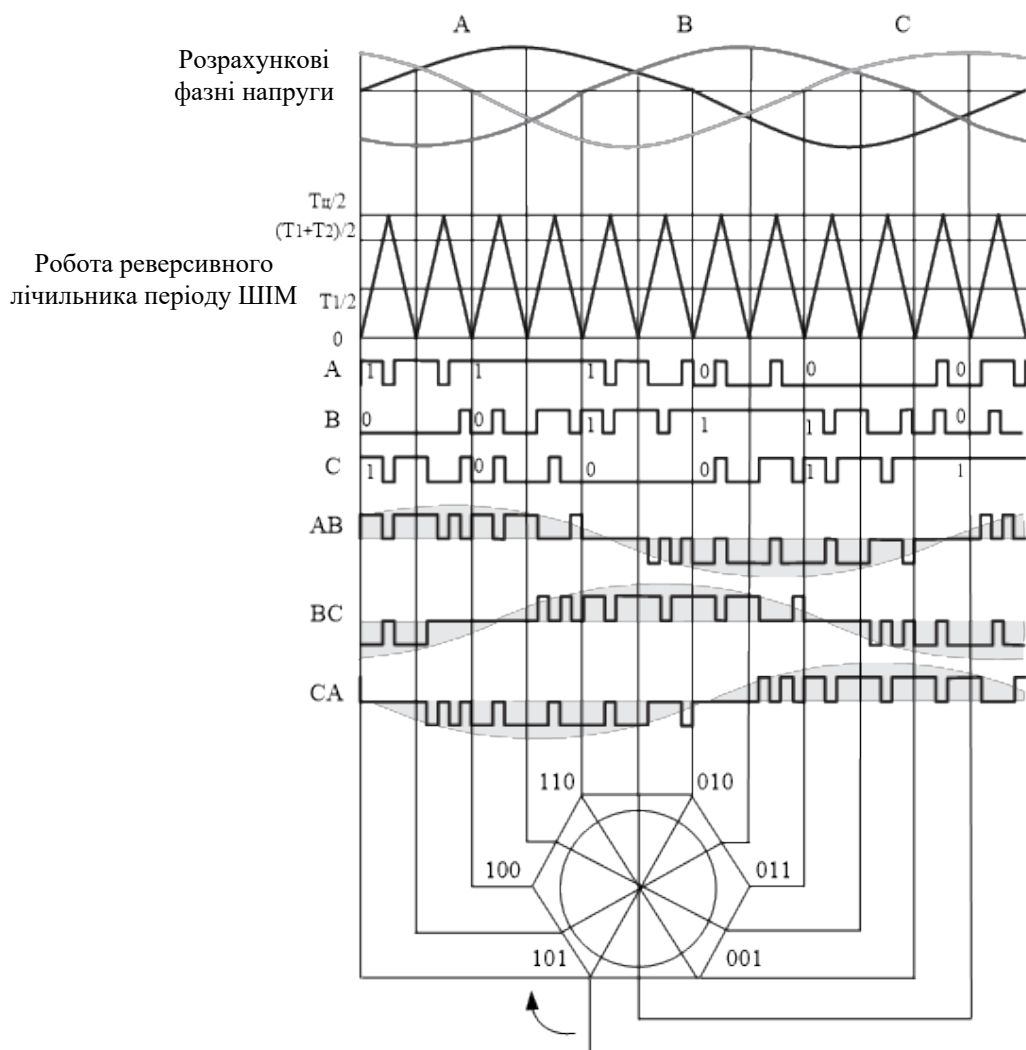


Рисунок 2.6 – Діаграми модулюючих синусоїдальних сигналів фаз А, В, С, розрахованих за поточним завданням вихідної частоти АН і несе сигналу

Реалізація методу Space Vector PWM ґрунтується на використанні загального лічильника періоду ШІМ з реверсивним відліком, а також регістрів порівняння, які в режимі «на льоту» зіставляють поточне значення таймера зі значеннями у відповідних регістрах. На основі результатів цього порівняння, за допомогою логічних схем управління, формуються керуючі імпульси для кожного з шести силових ключів інвертора з урахуванням необхідної комутаційної паузи, що запобігає короткому замиканню плечей.

У методі ШІМ моменти вмикання та вимикання транзисторів визначаються точками перетину синусоїдального модулюючого сигналу з високочастотною пилоподібною (трикутною) напругою розгортки. У ці моменти формується фронт імпульсу, що забезпечує керування відповідними силовими ключами інвертора U_p :

$$U_m = \sin(\omega t + \psi),$$

$$-90 \leq \psi \leq 90.$$

Для реалізації операцій програмного керування і регулювання, а також алгоритму ШІМ-управління, застосовуються спеціалізовані мікроконтролери – наприклад, цифрові сигнальні процесори типу TMS 320C24 виробництва Texas Instruments. Водночас, система управління перетворювачем енергії (СУПЕ) може бути також реалізована на програмованих логічних контролерах таких виробників, як Microchip, Analog Devices, Motorola, Siemens, Atmel, які мають широкий набір функціональних можливостей.

Сигнали з датчиків положення засувки (ДП1–ДП5), тиску (Н1, Н2), витрати (Q1, Q2), а також з датчика частоти обертання вала турбіни (ТГ), через модулі нормалізації та гальванічної розв'язки (МНГР) надходять на входи аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП1–3). Там аналогові сигнали перетворюються на цифровий код, що далі передається у пам'ять контролерів системи керування. Звідти дані надходять до електронно-обчислювальної машини (ЕОМ), де обробляються відповідно до алгоритму функціонування системи керування насосною установкою (НУ), узгодженого з поточним режимом регулювання продуктивності насосної станції (НС).

Опитування датчиків, передача даних до пам'яті ЕОМ, а також формування керуючих сигналів до виконавчих механізмів гідротурбіни здійснюється системою управління насосною станцією (СУНС) та системою

управління регулюючим механізмом (СУРМ). Останні формують сигнали запуску АЦП, цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) або приймають/передають дані згідно з вимогами керування.

Зв'язок між контролерами та ЕОМ здійснюється через СОМ-порти персонального комп'ютера, використовуючи послідовний інтерфейс RS-232C. Передача даних забезпечується за допомогою універсальних асинхронних приймально-передавачів (USART), вбудованих у контролери, а також перетворювачів рівнів сигналів (П1, П2), що адаптують сигнали до формату RS-232C, сумісного з СОМ-портами ПК.

Системи управління насосним комплексом і регулюючим механізмом гідротурбіни можуть бути реалізовані як на програмованих логічних контролерах, так і на цифрових сигнальних процесорах.

Оскільки датчик витрати Q2 встановлений у віддаленій точці гідравлічної мережі, передача даних про водоспоживання до ЕОМ здійснюється через модемний зв'язок. Основне завдання модему — оптимальне перетворення цифрового сигналу з АЦП в аналоговий для передачі по каналу зв'язку та зворотне перетворення на приймальній стороні. Під "оптимальним перетворенням" мається на увазі забезпечення надійності зв'язку, покращення відношення сигнал/шум і збільшення пропускної здатності каналу.

У ролі каналу зв'язку може бути використана міська телефонна мережа, виділена лінія або радіоканал.

Модеми різняться за конструкцією, підтримуваними протоколами, типами інтерфейсів тощо. Однак усі вони мають:

- керуючий мікропроцесор;
- ROM з прошитим ПЗ та інтерпретатором команд;
- NVRAM (енергонезалежна пам'ять) для зберігання конфігураційних профілів і телефонних номерів;
- буфер введення/виводу (128–256 байт);

- цифровий сигнальний процесор (DSP), що включає модулятор і демодулятор;
- інтерфейс для зв'язку з EOM (RS-232C);
- оперативну пам'ять.

Модеми підключаються до COM-портів ПК (іноді — до паралельного порту LPT або через плату розширення з додатковими буферами, що дозволяє досягти більш високого ступеня стиснення інформації).

Персональні комп'ютери зазвичай мають 2 або 4 COM-порти, що позначаються як COM1, COM2 тощо.

Модем може працювати в одному з двох режимів:

- режим даних — використовується для безпосередньої передачі інформації;
- командний режим — застосовується для налаштування та конфігурації модему. Цей режим доступний:
 - через COM-порт локального ПК;
 - з передньої панелі модему;
 - або віддалено, за умови підтримки такої функції.

Підключення до телефонної мережі зазвичай здійснюється через 6-контактний роз'єм RJ-11, з яких використовуються лише 4 контакти.

3 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАСОСНИМ КОМПЛЕКСОМ

3.1 Вибір силового обладнання

На підставі розрахункових даних для поворотнолопадної гідротурбіни, в якості активного регулювального пристрою САРП НС вибираємо діагональну поворотнолопадну гідротурбіну ДПЛ50-ВМ-65 (таблиця 3.1) з циліндричним напрямним апаратом, вертикальним розташуванням вала гідроагрегату і металевою підвідною водою трубою.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики гідротурбіни

Типорозмір гідротурбіни	ДПЛ50-ВМ-65
Діапазон напору на гідротурбіні, м	до 6...50
Діаметр проточної частини на вході в турбіну, мм	650
Частота обертання електрогенератора, об / хв	600-1000
Розрахунковий напір на гідротурбіні, м	5,5-17
Потужність на валу, кВт	45-315
Витрата води, м³/с	1,1-1,6
Призначений ресурс, годину	100 000

Потужність генератора:

$$P_{\text{ген}} = k_z \cdot P_{\text{т max}}. \quad (3.1)$$

де k_z – коефіцієнт запасу по потужності ($k_z = 1-1.2$);

$P_{\text{т max}}$ – максимальна потужність на валу гідротурбіни.

Величина потужності електричного генератора силової частини САРП НС(при $k_z=1.2$):

$$P_{\text{ген}} = 1.2 \cdot 267 = 320 \text{ (кВт)}.$$

Оскільки силова схема САРП побудована за принципом АГ-ПЧ, і вона характеризується найкращими технічними, вартісними та енергетичними показниками, в якості генератора САРП обирається асинхронний генератор. Він може бути реалізований на основі будь-якого промислового асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і номінальною потужністю, близькою до розрахункової. Технічні характеристики асинхронного генератора, що застосовується у САРП, наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри генератора САРП

Тип генератора	$P_n, \text{кВт}$	$n_n, \text{об/хв}$	η_n	$\cos \varphi$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{\min}}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$
4А355МУ3	320	1000	0.9 4	0.9	1	0.9	1.9	7

Для реверсу потужності на вході і виході електричної машини САРП, виберемо чотириквadrантний ПЧ АТ08-320 фірми Triol (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Основні технічні параметри і характеристики перетворювача частоти

Моделі	АТ08-320
Номінальна потужність двигуна P_n	320 кВт
Номінальна потужність	420 кВА
Номінальний струм навантаження I_n	370 А
Споживча мережа	3х660 В, +10%, -15%, 50(60) Гц + 2% з
Вихідна напруга	3х(0...660 В) + 2% Значення максимальної вихідної напруги програмуються

Продовження таблиці 3.3

Вихідна частота	0...50(100)Гц + 0,05% Значення максимальної и мінімальної частоти програмуються
Струм перевантаження	150% номінальне значення протягом 60
Коефіцієнт корисної дії (без двигуна), не менше	0.97
Коефіцієнт потужності (в точці підключення до мережі), не менше	0.95
Короткочасне допустиме відхилення напруги живильної мережі, при якому електропривод	-40%
Опір ізоляції гальванічне не пов'язаних кіл між собою і відносно корпусу, не менше	10 МОм
Електрична міцність ізоляції	4000 В, 50 Гц, протягом 1 хв
Умови навколишнього середовища	
Робоча температура	+1...+40°C до 90%
Вологість (без конденсації)	

3.2 Вибір елементів системи регулювання гідротурбіни

Підбір компонентів системи регулювання гідротурбіни передбачає визначення розмірів сервомоторів, типу регулятора потужності і частоти обертання гідротурбіни, виду мікропроцесорного нерегульованого устаткування (МНУ) та діаметра маслопроводів. Розв'язання цих завдань тісно пов'язане з конструктивними особливостями кожної конкретної турбіни, тому детальний розрахунок системи регулювання здійснюють заводи-виробники. Водночас при проектуванні САРП насосних станцій і інших систем з турбінами (наприклад, ГЕС або ГАЕС) часто виникає потреба

в отриманні попередніх даних, які можна здобути шляхом наближених розрахунків, оснований на узагальнених залежностях.

Розглянемо методику попереднього розрахунку складових системи регулювання поворотноголопатевої гідротурбіни САРП. Сервомотори направляючого апарату визначаються двома ключовими параметрами: розвиненим перестановочним зусиллям (тяговим моментом) M_T і ходом s_n . Тяговий момент M_T сервомоторів має компенсувати гідравлічні моменти M_g , що діють на лопатки, а також моменти тертя в опорах $M_{тр}$. Окрім того, у закритому положенні необхідно враховувати момент ущільнення лопатей M_y . Для направляючого апарату в закритому стані величина тягового моменту сервомотора $M_{T.з}$ визначається за умовою:

$$M_{T.з} \geq M_g + M_{тр} + M_y. \quad (3.2)$$

Тягове зусилля $M_{T.о}$ сервомотора при кожному відкритті направляючого апарату повинно долати гідравлічний момент і момент тертя:

$$M_{T.о} = \pm M_g + M_{тр}. \quad (3.3)$$

Гідравлічний момент вважається позитивним, якщо він спрямований на відкриття направляючого апарату. Якщо ж гідравлічний момент сприяє закриттю, його величина приймається від'ємною.

Для визначення необхідного тягового моменту на одну лопать слід володіти силовими характеристиками направляючого апарату. При цьому діаметр сервомотора вибирається, виходячи з відомого тягового моменту, мінімального заданого тиску масла та обраної схеми повороту. Однак встановити розміри сервомоторів таким способом складно, оскільки силові характеристики направляючого апарату зазвичай визначаються шляхом спеціальних досліджень моделей гідротурбін [1, 8, 11]. Тому для визначення діаметра сервомотора застосовують наближені формули розрахунку.

Хід сервомотора s_H :

$$s_H = (1.4-1.8)a_{0\max}, \quad (3.4)$$

$$a_{0\max} = a_{0\max M} \frac{D_T}{D_M}. \quad (3.5)$$

де D_T – діаметр робочого колеса використовуваної (натурної) гідротурбіни, м;

$a_{0\max M}$ – максимальне відкриття модельної турбіни, що визначається за головною універсальною характеристикою, мм;

D_M – діаметр модельної гідротурбіни, м.

Працездатність (робота, яку здійснять всі його поршні при своєму переміщенні з одного крайнього положення в інше):

$$A = M_T s_H. \quad (3.6)$$

Номінальна працездатність сервомоторів направляючого апарату:

$$A_H = k_H \rho g H_{T\max} \cdot \frac{b_0}{D_T} \cdot D_T^3. \quad (3.7)$$

де: k_H – безрозмірний коефіцієнт (для поворотнолопатних гідротурбін $k_H=0.045-0.055$);

$H_{T\max}$ – максимальний напір при якому працює турбіна, м;

b_0 – висота направляючого апарату;

D_T – діаметр гідротурбіни, м;

ρ – щільність води, кг/м^3 ;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Відносна висота направляючого апарату визначається за графіком (рисунок 3.1).

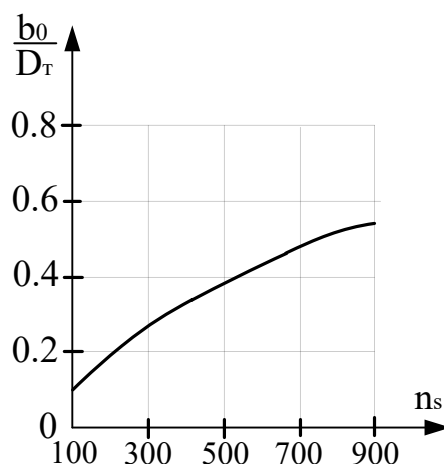


Рисунок 3.1 – Залежність відносної висоти направляючого апарату від швидкохідності турбіни

Швидкохідність турбіни n_s :

$$n_s = \frac{1.16n \cdot \sqrt{P_{\text{т расч}}}}{H_{\text{т расч}} \cdot \sqrt[4]{H_{\text{т расч}}}}. \quad (3.8)$$

де n – частота обертання, об/хв;

$P_{\text{т расч}}$ – розрахункова потужність турбіни, кВт;

$H_{\text{т расч}}$ – розрахунковий напір турбіни, м.

Сумарний обсяг всіх сервомоторів направляючого апарату:

$$W_H = \frac{A_H}{p_H}. \quad (3.9)$$

де p_H – номінальний тиск МНУ, Па.

Діаметр кожного сервомотора:

$$d_{\text{серв.н}} = \sqrt{\frac{4W_H}{\pi s_H m_c}}. \quad (3.10)$$

де m_c – кількість сервомоторів направляючого апарату, залежне від потужності гідротурбіни [8]: для потужних турбін $m_c=2$, дрібних і середніх- $m_c=1$).

Працездатність сервомотора робочого колеса поворотноголопатної гідротурбіни визначається з виразу:

$$A_k = k_k \rho g H_{T \max} \cdot D_T^3 \cdot \left(1 - \frac{d_{BT}^2}{D_T^2}\right). \quad (3.11)$$

де k_k – безрозмірний коефіцієнт рівний 0.05-0.06;

d_{BT} – діаметр втулки робочого колеса, м.

Відносний діаметр втулки робочого колеса турбіни $\frac{d_{BT}}{D_T}$ залежить від кількості лопатей і лежить в межах 0.33...0.6 D_T [8].

Об'єм сервомотора поворотноголопатної гідротурбіни:

$$W_k = \frac{A_k}{p_H}. \quad (3.12)$$

Сервомотор робочого колеса, як правило, має відносно невеликий хід, але при цьому повинен забезпечувати значне призупиняюче зусилля, необхідне для подолання гідродинамічного впливу на лопаті та сил тертя. Діаметр сервомотора робочого колеса визначається виробником гідротурбіни на основі експериментального встановлення необхідної довжини його ходу.

Типорозмір регулятора потужності залежить від діаметра головного золотника d_z , який взаємодіє з сервомоторами направляючого апарату. Діаметр головного розподільного золотника, як правило, приймається рівним діаметру маслопроводу, що визначається за витратою масла та допустимою швидкістю його руху в трубопроводі v_1 :

$$Q_3 = \frac{W_H}{T_s}, \quad (3.13)$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4Q_3}{\pi v_M}}. \quad (3.14)$$

де T_s – мінімальний час повного відкриття або закриття направляючого апарату, с.

На основі розрахунків процесів регулювання маємо: $v_M = 5 \dots 6$ м/с, $T_s = 3 \dots 15$ с. Знайдена величина d_3 округлюється до більшого номенклатурного діаметра [8].

Мікропроцесорне нерегульоване устаткування (МНУ) добирається відповідно до заданого номінального тиску $p_H = 2.5\text{--}4$ МПа [8]. Основним завданням розрахунку є визначення необхідного типу МНУ, а саме — обсягу маслоповітряного котла (акумулятора), який зазвичай заповнений маслом приблизно на одну третину. Об'єм котла визначається, виходячи з сумарного обсягу та витрат масла, яке споживається всіма сервомоторами, що живляться від цієї системи. При цьому також враховується необхідний запас масла на випадок аварійного відключення електродвигунів насосів.

Повний обсяг маслоповітряного котла МНУ для поворотнолопатевої гідротурбіни визначається як сума таких складових:

$$W_{\text{мну}} = (18 \div 20)W_H + (4 \div 5)W_K. \quad (3.15)$$

Отриманий обсяг округлюється до найближчого значення [8].

З універсальної характеристики – максимальне відкриття модельної турбіни складає $a_{0\text{max м}} = 46$ мм, а її діаметр дорівнює $D_M = 0.46$ м.

Оскільки потужність поворотнолопатевої турбіни, що використовується в САРП, є порівняно невеликою (267 кВт), номінальний тиск у МНУ приймається рівним $p_H = 4$ МПа. Мінімальний час повного

відкриття або закриття направляючого апарату задається як $T_s=3$ с, а швидкість руху масла в системі приймається $v=5$ м/с.

Швидкохідність гідротурбіни САРП, розрахункові характеристики якої наведено в таблиці 2.2:

$$n_s = \frac{1.16 \cdot 768 \cdot \sqrt{179}}{13.3 \cdot \sqrt[4]{13.3}} = 340.$$

З графіка 3.1 видно, що для турбіни з швидкохідністю $n_s=340$ об/хв відносна висота направляючого апарату $\frac{b_0}{D_t} = 0.28$. Відносний діаметр втулки робочого колеса $\frac{d_{вт}}{D_t}$ приймаємо 0.35.

Безрозмірні коефіцієнти приймаємо $k_n = k_k = 0,05$. Вони необхідні для визначення працездатності сервомоторів поворотноголопастної гідротурбіни.

Оскільки поворотноголопастна турбіна, що використовується, має невелику потужність, для повороту направляючого апарата застосовується спрощена схема управління з використанням лише одного сервомотора ($m_c = 1$).

Параметри і розміри направляючого апарату і його сервомоторів:

– працездатність сервомотора

$$A_n = 0.05 \cdot 1000 \cdot 9.81 \cdot 46.8 \cdot 0.28 \cdot 0.65^3 = 1765 \text{ (Дж)}.$$

– обсяг сервомотора

$$W_n = \frac{1765}{4 \cdot 10^6} = 0.000441 \text{ (м}^3\text{)}.$$

– максимальне відкриття направляючого апарату

$$a_{0\max} = 0.046 \frac{0.65}{0.46} = 0.065(\text{м}).$$

– хід поршня сервомотора

$$s_{\text{н}} = 1.5 \cdot 0.065 = 0.0975(\text{м}).$$

– діаметр сервомотора

$$d_{\text{сервн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.004441}{3.14 \cdot 0.0975 \cdot 1}} = 0.076(\text{м}).$$

Розрахункові параметри направляючого апарату гідротурбіни і його сервомотора (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Параметри направляючого апарату і його сервомотора

Тип	A_i , Дж	W_i , м ³	$a_{0\max}$, мм	$a_{0\text{ію}}$, мм	s_i , м	$d_{i\text{ пàдà}}$, м
Радіальний	1765	0.00441	65	45	0.0975	0.24

З виразів (3.13), (3.14) витрата і діаметр головного золотника регулятора сервомотора направляючого апарату відповідно рівні:

$$Q_3 = \frac{0.000441}{3} = 1.47 \cdot 10^{-4} (\text{м}^3 / \text{с}),$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 1.47 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 5}} = 0.006(\text{м}).$$

Технічні характеристики електрогідравлічного регулятора з мікропроцесорним управлінням ЄДР-МП-6 показано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики РМ і частоти обертання турбіни

Типорозмір	ЭГР-МП-6
Діаметр головного золотника, мм	6
система управління	PLC, PIC16f877
Зона нечутливості по частоті, %	0,01
Час запізнювання T_q , сек	0,2
Вхідний сигнал частоти обертання, В	0-10
Вхідний сигнал частоти енергосистеми - трансформатор напруги, В; ВА	100...120; 10
Вхідні аналогові сигнали з гальванічною розв'язкою, мА	4...20
Вихідні аналогові сигнали з гальванічною розв'язкою, мА	4...20
Живлення	
Від мережі змінного струму, В	220 +10% -15%
Від мережі постійного струму, В	220 +10% -20%
Споживана потужність до, ВА	300

Для вибору маслонапірної установки визначимо працездатність і відповідно обсяг сервомотора робочого колеса:

$$A_k = 0.05 \cdot 1000 \cdot 9.81 \cdot 46.8 \cdot 0.65^3 \cdot (1 - 0.35^2) = 5532 (\text{Дж}),$$

$$W_n = \frac{5532}{4 \cdot 10^6} = 0.00138 (\text{м}^3).$$

Обсяг котла МНУ:

$$W_{\text{мну}} = 18 \cdot 0.000441 + 4 \cdot 0.00138 = 0.0135 (\text{м}^3).$$

Для обсягу котла приймаємо МНУ-0.016-4 (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Параметри МНУ

Тип	Номінальний тиск p_n , МПа	Об'єм котла $W_{\text{мну}}$, м ³
МНУ-0.016-4	4	0.016

Керування напрямком і швидкістю переміщення штоків сервомоторів направляючого апарата та робочого колеса турбіни здійснюється за допомогою електромагнітних золотників 31 і 32, технічні характеристики яких наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Параметри золотників сервомоторів

Спосіб керування	Електромагнітний
Кількість позицій	Трьохпозиційний
Напруга керування U, В	0-24В

Для забезпечення необхідної точності вимірювань та формування керуючих сигналів у системі автоматичного регулювання параметрів (САРП) рекомендується використовувати аналого-цифрові (АЦП) та цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), що відповідають таким вимогам:

- розрядність не менше 12 біт;
- частота дискретизації — не менше 100 кГц;
- діапазон вхідної/вихідної напруги — до 10 В;
- кількість каналів АЦП — щонайменше чотири.

Для збору інформації з датчиків, які використовуються в системі управління насосним комплексом з САРП (рисунок В.1), а також для формування керуючих сигналів для електромагнітів сервомоторів, обрано мікросхеми АЦП і ЦАП виробництва Analog Devices, провідної компанії у сфері аналогових електронних компонентів.

Зокрема, для перетворення аналогових сигналів з:

- датчиків положення засувки ДП1–ДП5,
- витратоміра на виході насосної станції Q1,
- датчиків тиску Н1, Н2,
- датчика частоти обертання вала гідротурбіни ТГ —використовується 12-розрядна багатоканальна мікросхема AD7891. У випадках, де вимагається підвищена точність (наприклад, для тиску Н1, Н2 та частоти обертання ТГ), може бути застосований 16-розрядний багатоканальний АЦП AD974, який проходить заводське калібрування і має визначені динамічні характеристики: SNR, THD, коефіцієнт посилення, зсув і лінійність.

Для перетворення сигналу з витратоміра Q2, розташованого у віддаленій контрольній точці водогінної мережі, використовується одноканальний АЦП AD7895.

Основні характеристики використовуваних АЦП:

- AD7891:
 - 8-канальний, 12-розрядний SAR-АЦП;
 - Частота дискретизації — до 500 ksps;
 - Працює від однополярного джерела +5 В;
 - Містить вхідний мультиплексор, вбудований тактовий генератор;
 - Підтримує як внутрішнє, так і зовнішнє джерело опорної напруги (+2.5 В);
 - Має паралельний інтерфейс, низький рівень шуму, широку смугу пропускання;
 - Споживана потужність — до 85 мВт, можливий енергозберігаючий режим.
- AD7895:
 - Одноканальний, 12-розрядний SAR-АЦП;
 - Частота дискретизації — до 200 ksps;
 - Працює від +5 В, зовнішнє джерело опорної напруги;

- Послідовний інтерфейс обміну;
- Низький рівень шуму, широка смуга пропускання;
- Автоматичний перехід у режим зниженого енергоспоживання після завершення перетворення;
- Споживана потужність — до 20 мВт.
- AD974:
 - 16-розрядний багатоканальний АЦП;
 - Підтримка біполярних (± 2.5 В, ± 5 В, ± 10 В) та однополярних (0–2.5 В, 0–5 В) діапазонів вхідної напруги;
 - Пройшов заводське калібрування, що забезпечує високу точність вимірювань.

Мікросхеми AD7891 і AD7895 доступні у стандартних корпусах DIP, SSOP і SOIC, що спрощує їхнє застосування у різних конфігураціях системи.

Структурні схеми SAR-АЦП та відповідного вбудованого ЦАП на комутованих конденсаторах зображені на рисунках 3.9 та 3.10.

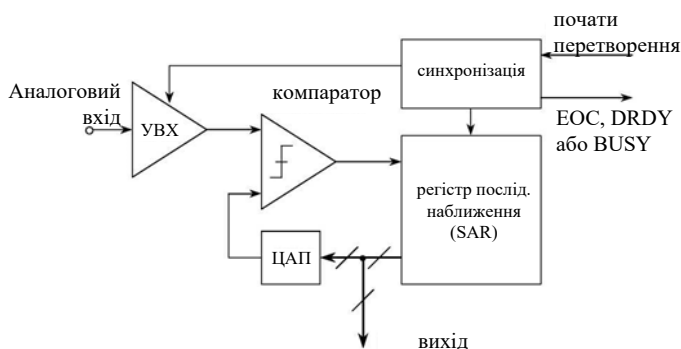


Рисунок 3.9 – Структурна схема АЦП послідовного наближення

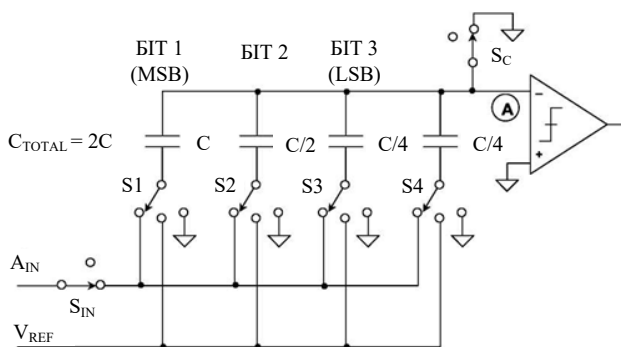


Рисунок 3.10 – Структурна схема ЦАП на комутованих конденсаторах

Основні технічні характеристики використовуваних мікросхем АЦП AD7891, AD7895, а також AD974 наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Технічні характеристики АЦП

Тип АЦП	AD7891	AD7895	AD974
Швидкість(частота дискретизації), (ksps)	500	200	200
Розрядність, біт	12	12	16
Кількість каналів	8	1	4
Діапазони вхідних сигналів, В (FS Input Range, V)	$\pm 2.5\text{В}; \pm 5\text{В};$ $\pm 10\text{ В};$ $0-2.5\text{В}; 0-4\text{ В}$	$0-2.5\text{В};$ $\pm 2.5\text{В};$ $\pm 10\text{В};$	$\pm 10\text{ В}; 0-$ $4\text{В};$ $0-5\text{ В}$
Інтерфейс (Ser/Par)	Par	Ser	Ser
Вихідний сигнал (I - ток, U - напруга)	U	U	U
Час встановлення вихідного сигналу у, мкс	10	8	8
Тип АЦП	AD7891	AD7895	AD974
Напруга живлення $U_{\text{ном}}$, В	+5	+5	+5
Макс. Потужність користувача W_{max} , мВт	85	20	120
Джерело опору напруги (REF), Int/Ext	Int +2.5 В; Ext	Ext	Int +2.5 В; Ext
Тактовий генератор (Clock), Int/Ext	Int	Int	Int

Для формування керуючих сигналів, що подаються на електромагніти ЕМ1–ЕМ4 золотників сервомоторів направляючого апарату (31) та робочого колеса (32), відповідно до алгоритму функціонування системи,

застосовуються два цифро-аналогові перетворювачі AD5322 виробництва Analog Devices.

Мікросхема AD5322 є здвоєним 12-розрядним ЦАП з послідовним інтерфейсом введення/виведення типу SPI та частотою оновлення до 100 кГц. Пристрій живиться від однополярного джерела напругою в діапазоні від +2,5 В до +5,5 В. Його структурна схема представлена на рисунку 3.11.

Основні технічні характеристики AD5322:

- Розрядність: 12 біт;
- Кількість каналів: 2 (незалежні ЦАП);
- Споживана потужність при +3 В — 690 мкВт;
- У режимі зниженого енергоспоживання — лише 0,15 мкВт;
- Рівень гармонійних спотворень (THD) не перевищує –70 дБ на частоті 10 кГц щодо повної шкали;
- Опорна напруга подається окремо для кожного каналу через відповідні виводи мікросхеми. Вона може бути подана як через внутрішні буферні підсилювачі, так і безпосередньо;
- Одночасне оновлення вихідних сигналів обох каналів забезпечується асинхронним сигналом LDAC.

Завдяки таким параметрам, AD5322 є ефективним рішенням для реалізації високоточної багатоканальної системи керування електромагнітними виконавчими механізмами гідротурбіни при мінімальному енергоспоживанні.

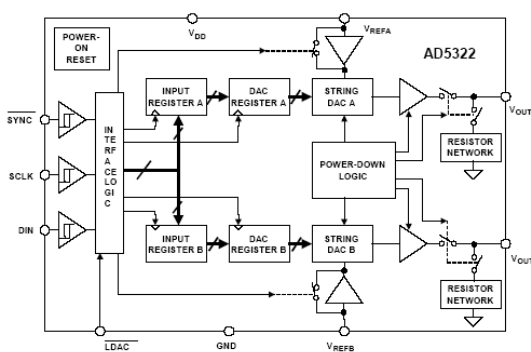


Рисунок 3.11 – Функціональна схема ЦАП AD5322

Пристрій оснащений вбудованою схемою формування сигналу скидання, яка забезпечує нульове значення вихідного сигналу ЦАП доти, поки в нього не будуть записані коректні дані. Передача даних у мікросхему AD5322 зазвичай здійснюється через послідовний інтерфейс SPI із використанням сигналів SCLK (тактовий сигнал), DIN (дані) та SYNC (сигнал синхронізації) від контролера або процесора.

При переході сигналу SYNC в активний низький рівень (логічний "0") дозволяється введення даних у приймальний регістр зсуву ЦАП. Запис даних відбувається по заднім фронтах 16 наступних імпульсів тактового сигналу SCLK. Частота і форма сигналів SCLK і SYNC задаються генератором тактового сигналу контролера або мікропроцесора, а також є можливість зовнішнього генерування цих сигналів для AD5322.

Вхідний регістр зсуву мікросхеми має розрядність 16 біт. Формат 16-бітного слова:

- Перші 4 біти – управляючі біти:
 - Біт 15 – вибір каналу ЦАП: 0 – канал А, 1 – канал В.
 - Біт 14 – режим опорної напруги: 0 – буферизований, 1 – небуферизований.
 - Біти 13 і 12 – режими роботи ЦАП:
 - 00 – нормальний режим,
 - 01 – режим зниженого енергоспоживання із заземленням виходу через 1 кОм,
 - 10 – режим зниженого енергоспоживання із заземленням виходу через 100 кОм,
 - 11 – режим зниженого енергоспоживання з високоімпедансним виходом.
- Наступні 12 біт (11–0) – цифрове значення керуючого сигналу для ЦАП.

Такий протокол передачі забезпечує надійне керування режимами роботи та вибір каналу ЦАП, а також гарантує коректне формування вихідного сигналу.

Технічні показники мікросхеми ЦАП AD5322 (таблиця 3.9).

Таблиця 3.9 – Технічні характеристики ЦАП

Тип АЦП	AD5322
Швидкість (частота дискретизації), кГц	100
Разрядність, біт	12
Кількість каналів	2
Інтерфейс	Послідовний (SPI, I ² C)
Напруга живлення $U_{ном}$, В	+2.5-5
Тип виходу (I - струм, U - напруга)	U
Потужність користувача W, мкВт	680
Буферизація	Єсть
Типовий час встановлення, мкс	22
Джерело опору напруги (REF), Int/Ext	Ext
Тактовий генератор (Clock), Int/Ext	Int

Для управління електромагнітами EM1-EM4 золотників 31, 32 використовується багатоканальний ЦАП фірми MAXIM (таблиця 3.10).

Таблиця 3.10 – Технічні характеристики багатоканальних ЦАП

Тип	MAX526	MAX527
Разрядність, біт	12	12
Число каналів	4	4

Продовження таблиці 3.10

Тип	MAX526	MAX527
Інтерфейс (Ser/Par)	Par	Par
Тип виходу (I - струм, U - напруга)	U	U
Напруга живлення, В	+12...+15, -5	+5
Максимальний струм користувача, мА	38	32
Типовий час встановлення, мкс	3	5
Джерело опору живлення (REF), Int/Ext	Ext	Ext
Буферизація	Є	Є
Корпус	24/PDIP.300	24/PDIP.300
	24/SO.300	24/SO.300

В якості датчиків положення засувки Z1–Z5 застосовуються безконтактні кутові датчики переміщення з абсолютним відліком ДУП-1А4. Ці датчики вирізняються високими метрологічними характеристиками, надійністю в експлуатації та низькою вартістю. Технічні характеристики датчика ДУП-1А4 наведені в таблиці 3.11, а залежність «вхід (кутове переміщення) – вихід (електричний сигнал)» (рисунок 3.12).

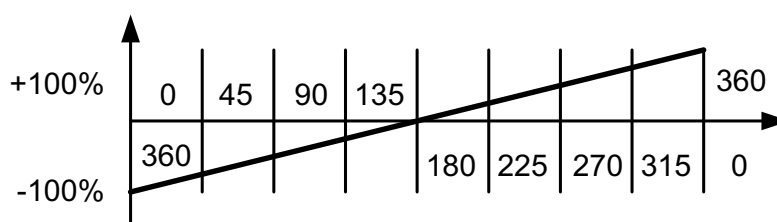


Рисунок 3.12 – Вигляд характеристики кутове переміщення – електричний сигнал датчика ДУП-1А4

Сигнал з датчика може збільшуватись або зменшуватись при повороті осі, мати позитивну або негативну полярність в усьому діапазоні переміщень, а також бути двополярним.

Таблиця 3.11 – Технічні характеристики датчиків положення засувки

Тип	ДУП-1А4
Діапазон вимірів	від $\pm 60^\circ$ (0° - 180°) до $\pm 180^\circ$ (0° - 360°)
Основна похибка, $\pm \%$	0.5 – 1
Діапазон робочих температур, $^\circ\text{C}$	- 30...+ 60
Додаткова температурна похибка «0», $\%/^\circ\text{C}$	0.015
Додаткова температурна похибка шкали, $\%/^\circ\text{C}$	0.08
Полоса пропускання (- 3 dB), Гц	600
Напруга живлення, В	$\pm 5 \dots \pm 15$
Використаний струм, мА	3
Вихідний сигнал, В	від $0 \dots \pm 2$ до $0 \dots \pm 10$
Габарити датчика, мм	Ф46х30, влаштована електроніка
Вага, г	62
Матеріал корпусу	алюміній

Датчик для контролю та визначення частоти обертання вала гідротурбіни і АГ використовується тахогенератор ТГ-24-03 з технічними характеристиками наведеними в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Технічні дані датчика частоти обертання

Тип	Діапазон вимірів n, об/хв	Вихідна напруга U, В
ТГ-24-03	0-3000	0-10

Датчики витрати Q1 і Q2 вибираються виходячи з діапазону зміни витрати на виході НС і витрати в мережі споживача, змінюється в межах 3000-6500 м³/год і діаметрів трубопроводів (800 мм і 1200 мм).

Для вимірювання витрати використовується кореляційний датчик витрати ДРК-3 (рисунок 3.13), призначений для визначення витрати і об'єму води в повністю заповнених трубопроводах.

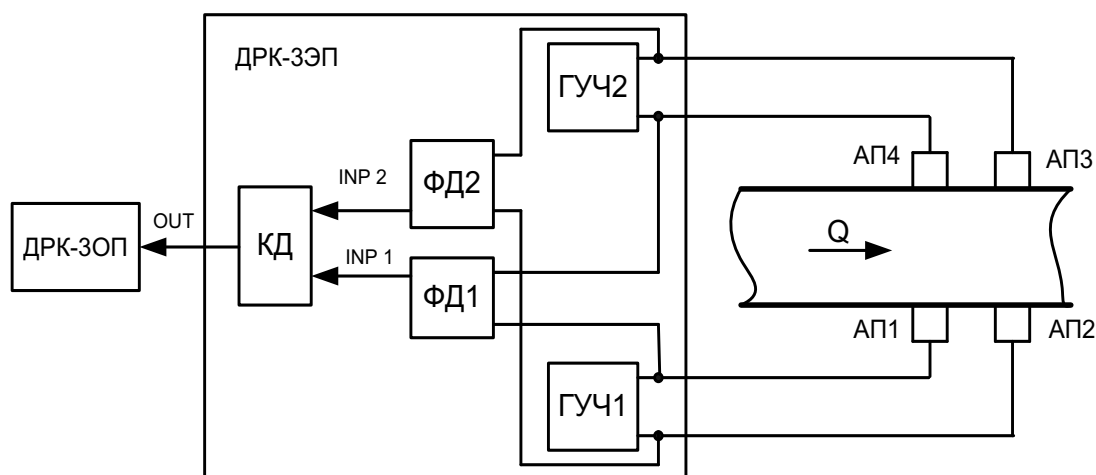


Рисунок 3.13 – Структурна схема кореляційного датчика витрати ДРК-3

Основні технічні характеристики та принцип дії датчика ДРК-3:

Датчик застосовується як у технологічних процесах, так і для комерційного обліку, зокрема в системах водопостачання.

Переваги ДРК-3:

- Безпротіковий, імітаційний метод повірки;
- Міжповірочний інтервал — 4 роки;
- Відсутність рухливих елементів у проточній частині;
- Можливість монтажу первинних перетворювачів на трубопроводі в будь-якій орієнтації щодо його осі;
- Корекція показань з урахуванням неточності монтажу первинних перетворювачів;
- Збереження інформації при відключенні живлення протягом 10 років.

ДРК-3 складається з таких основних частин:

- Комплект первинних перетворювачів ДРК-ЗПП;
- Електронний перетворювач ДРК-ЗЕП;
- Кінцевий перетворювач ДРК-ЗСП.

Комплект первинних перетворювачів включає 4 акустичних перетворювачі ДРК-ЗАП з кабелями довжиною 3 м і 4 штуцери для монтажу на трубопроводі.

Електронний перетворювач ДРК-ЗЕП та кінцевий перетворювач ДРК-ЗСП виконані в пластмасових корпусах.

У корпусі ДРК-ЗЕП розміщені:

- Плати генераторів ультразвукової частоти (ГУН);
- Фазові детектори (ФД);
- Кореляційний дискримінатор (КД), який включає корелятор, мікропроцесор, незалежну пам'ять (RAM);
- Блок формування вихідного імпульсного сигналу;
- Інтерфейс RS232 для зв'язку з комп'ютером.

Корпус ДРК-ЗСП містить:

- Пристрій гальванічної розв'язки входних ланцюгів із джерелом живлення та вихідними ланцюгами;
- Блок живлення 220 В, 50 Гц;
- ЦАП для формування уніфікованого струмового вихідного сигналу 0–5 В, 4–20 мА.

Також у корпусах електронного і кінцевого перетворювачів розташовані:

- Плати з контактними колодками, закриті фальшпанеллю;
- Термовводи для зовнішніх кабелів;
- Плата блоку індикації безпосередньо під кришкою.

Датчики ДРК-3 працюють на основі кореляційної дискримінації часу проходження випадкових флуктуацій, викликаних турбулентністю, між

двома парами ультразвукових акустичних перетворювачів: АП1–АП4 та АП2–АП3 (див. рисунок 3.11).

Цей час транспортного запізнювання відображає витрату середовища, що рухається по трубопроводу.

Під час роботи акустичні перетворювачі АП1–АП4, які активуються генераторами ультразвукових коливань (ГУЧ1 і ГУЧ2), випромінюють ультразвукові хвилі. Ці хвилі, проходячи через потік рідини, викликають виникнення вторинних електричних коливань на приймачах (АП).

Завдяки взаємодії зустрічних ультразвукових променів із неоднорідностями потоку (наприклад, турбулентністю), ці коливання модулюються.

Далі сигнали надходять на фазові детектори (ФД1 і ФД2) та передаються на кореляційний дискримінатор (КД), що керується мікропроцесором.

В результаті кореляційної обробки визначається час транспортного запізнювання, за яким мікропроцесор обчислює період вихідних імпульсів і формує їх.

Кореляційний дискримінатор визначає обсяг (наростаючим підсумком), миттєву витрату, час напрацювання і виводить інформацію на індикатор.

Вихідні імпульси перетворювача ДРК-ЗЕП передаються на крайовий перетворювач ДРК-ЗСП, який формує уніфікований струмовий сигнал 0–5 мА або 4–20 мА, пропорційний миттєвій витраті.

Основні технічні характеристики датчика витрати ДРК-3-В2

- Вимірюване середовище: вода (питна, технічна, річкова, стічна та інші)
- Температура: від 1 до 150 °С
- Тиск: до 2,5 МПа
- В'язкість: до $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с (2 сСт)

- Внутрішній діаметр трубопроводу: понад 300 мм
- Межі вимірювання витрати:
 - Для трубопроводів діаметром 800 мм — від 181 до 18 100 м³/год
 - Для трубопроводів діаметром 1200 мм — від 407 до 40 700 м³/год
- Динамічний діапазон: 1:100
- Допустима відносна похибка вимірювань:
 - За об'ємом і витратою (імпульсний сигнал і індикатор):
±1,5...±2,0 %
 - За часом напрацювання: ±0,1 %
- Допустима зведена похибка вимірювань витрати за струмовим сигналом: ±1,5...±2,0 %

Параметри вихідних сигналів

- Струмо-імпульсний (ТІ):
 - Тривалість імпульсу: не менше 250 мс
 - Амплітуда: (10 ± 3) мА
 - Опір навантаження: не більше 500 Ом
- Замкнуто-розімкнутий (оптопара):
 - Напруга комутації: не більше 30 В
 - Струм комутації: не більше 100 мА
- Уніфікований струмовий:
 - 0–5 мА, опір навантаження — не більше 2 кОм
 - 4–20 мА, опір навантаження — не більше 500 Ом
- Інтерфейс: RS232
- Живлення: 220 В, 50 Гц

Примітка щодо ціни імпульсу

Ціна імпульсу вибирається із ряду: 0,01; 0,1; 1,0; 10; 100 м³/імп, але не повинна бути меншою за значення $1,4 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{\max}$, де $Q_{\max}$ — максимальна можлива витрата в трубопроводі.

Датчики тиску для контролю напору гідротурбіни

Для контролю напору гідротурбіни застосовуються датчики тиску фірми Honeywell, які являють собою тензометричний місток на кремнієвій мембрані з чотирьох резисторів.

Принцип дії: при прогині мембрани під зовнішнім тиском змінюється опір одного з резисторів, що викликає розбалансування моста і появу диференційного сигналу, пропорційного тиску.

Датчики мають пластмасовий корпус, не містять додаткових схем обробки сигналу на кристалі і характеризуються відносно низькою ціною.

Технічні характеристики наведені в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Технічні характеристики датчиків тиску

Найменування	4040PC10G4D
Макс. робочий тиск, кПа	1035
Макс. допустимий тиск, кПа	3100
Напруга живлення $U_{\text{пит}}$, В	5,0
Вихідна напруга $U_{\text{сп}}$, мВ	4500
Чутливість, мВ/кПа	4,3
Компенсація, калібровка	є
Вимірюване середовище	вода, бензин
Лінійність, %от $U_{\text{сп}}$	0,1
Діапазон робочих температур, °С	-40...+125

Для гальванічної розв'язки аналогових керуючих сигналів електромагнітами і нормалізації сигналів з датчиків контрольованих параметрів (тиску, частоти обертання, положення, витрати) використовуються модулі нормалізації і гальванічної розв'язки аналогових сигналів сімейств SCM5B і SCM7B, які забезпечують повне вирішення питань прийому/видачі, перетворення і нормалізації сигналів різного рівня, забезпечуючи захист вимірювальних і управляючих сигналів і устаткування

від небезпечних і руйнівних шумів і перешкод, імпульсних кидків напруги, перешкод у ланцюгах заземлення та інших негативно впливають факторів.

З причини того, що в системі управління насосним комплексом застосовуються датчики і пристрої з різними вихідними інтерфейсами і рівнями сигналів управління, для забезпечення точності і надійності вимірювань і формування сигналів управління використовуються модулі гальванічної розв'язки керуючих сигналів і нормалізації сигналів з датчиків з струмовим вхідними та вихідними інтерфейсами, а також модулі де вхідним або вихідним сигналом є напруга. Технічні характеристики таких пристроїв наведені в таблиці 3.14 .

Таблиця 3.14 – Технічні характеристики модулів гальванічної розв'язки і нормалізації аналогових сигналів

Назва	SCM5B-39	SCM7B-31
Гальванічна розв'язка, В скз	1500	1500
Придушення перешкоди загального вигляду, db	160	160
Діапазон робочих температур, °C	- 40 .. +80	- 40 .. +80
Напрацювання на відміну, год	Більше 500 000	Більше 500 000
Придушення перешкоди нормального виду, db (Hz)	95 (60); 90 (50)	85 (60); 80 (50)
Рівень тривалого захисту входу / виходу, VАС	240	120
Напруга живлення	5 В ± 5 % (30 - 350 мА)	14 - 35 В (12 - 70 мА)

Продовження таблиці 3.14.

Вихідні сигнали	0-20, 4-20 , ± 20 мА	± 10 мВ.. ± 10 В; 0 -10 мВ ..0 - 10 В;
Нормативні вихідні сигнали	± 5 В; ± 10 В; 0 - 5 В; 0-10 В; 0 - 20 мА;	± 5 В; ± 10 В; 0 - 5 В; 0-10 В; 0 - 20 мА;
Полоса частот	4 Гц-1 кГц	До 3 кГц
Похибка перетворення, %	± 0.05	± 0.03
Габаритні розміри, мм	58x57x15	54.1x43.3x15.4

Для посилення керуючих сигналів електромагнітів EM1–EM4 електромагнітних золотників 31 і 32 застосовуються аналогові мікросхеми фірми ANALOG DEVICES, які виконують функції операційних підсилювачів з диференціальним входом. Основні технічні характеристики цих мікросхем наведені в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Технічні характеристики підсилювачів

Type	Freq Range (MHz)	Gain (dB)	Output P1dB (dBm)	Output IP3 (dBm)	Noise Figure (dB)	Supply (V)	Power (mA)	Package Type
AD630	700	24	11 (70 MHz)	22 (70 MHz)	4	± 4.25 to ± 5.25 8.5 to 10.5	30	16-lead SOIC

Для реалізації системи управління насосним комплексом і регулюючим механізмом гідротурбіни застосовуються програмовані логічні мікроконтролери Microchip серії PIC16F877, які мають такі технічні характеристики:

- Архітектура:
 - Високошвидкісна RISC-архітектура з набором 35 інструкцій;

- Виконання більшості команд за один тактовий цикл (крім переходів – два цикли);
- Тактовий генератор:
 - Частота до 20 МГц;
 - Тактовий сигнал 200 нс (один машинний цикл);
- Пам'ять:
 - 8 КБ FLASH-пам'яті для програм (14-бітні слова);
 - 368 байт оперативної пам'яті (RAM);
 - 256 байт EEPROM для збереження даних;
- Периферія та функції:
 - Система переривань з підтримкою до 14 джерел;
 - 8-рівневий апаратний стек;
 - Режими адресації: пряма, непряма, відносна;
 - Режим скидання при включенні живлення (POR);
 - Таймер скидання (Power-up Timer, PWRT);
 - Таймер очікування запуску генератора (Oscillator Start-up Timer, OST);
 - Сторожовий таймер (Watchdog Timer, WDT) із власним RC-генератором;
 - Захист пам'яті програм;
 - Режим енергозбереження (SLEEP);
 - Можливість вибору параметрів тактового генератора;
 - Технологія CMOS FLASH/EEPROM із низьким енергоспоживанням, повністю статична архітектура;
 - Програмування в готовому пристрої з низьковольтним режимом;
 - Режим внутрішньосхемного налагодження;
- Живлення:
 - Напруга живлення 2,5...5,5 В;
- Інтерфейси вводу/виводу:

- Підвищена здатність навантаження портів — до 25 мА;
- Енергоспоживання:
 - Менше 0,6 мА при 3 В і 4 МГц;
 - Менше 1 мкА у режимі енергозбереження.

Основні периферійні модулі, які дозволяють вирішувати широкий спектр завдань:

- Таймер 0 — 8-бітний таймер/лічильник із 8-бітним програмованим дільником частоти;
- Таймер 1 — 16-бітний таймер/лічильник із можливістю підключення зовнішнього резонатора;
- Таймер 2 — 8-бітний таймер/лічильник із 8-бітним програмованим дільником і вихідним дільником;
- Два модулі порівняння/захоплення/ШИМ (PWM) з можливостями:
 - 16-бітного захоплення (максимальна роздільна здатність 12,5 нс);
 - 16-бітного порівняння (максимальна роздільна здатність 200 нс);
 - 10-бітної широтно-імпульсної модуляції;
- 8-канальний 10-бітний АЦП;
- Послідовний синхронний порт MSSP із підтримкою SPI та I2C (режими ведучий/ведений);
- Послідовний асинхронний приймач USART із підтримкою детектування адреси;
- 8-розрядний паралельний порт PSP з підтримкою зовнішніх сигналів RD, WR, CS;
- Детектор зниженої напруги (Brown-Out Detect, BOD) для автоматичного скидання при зниженні напруги живлення.

Структурна схема мікроконтролера наведена на рисунку 3.14.

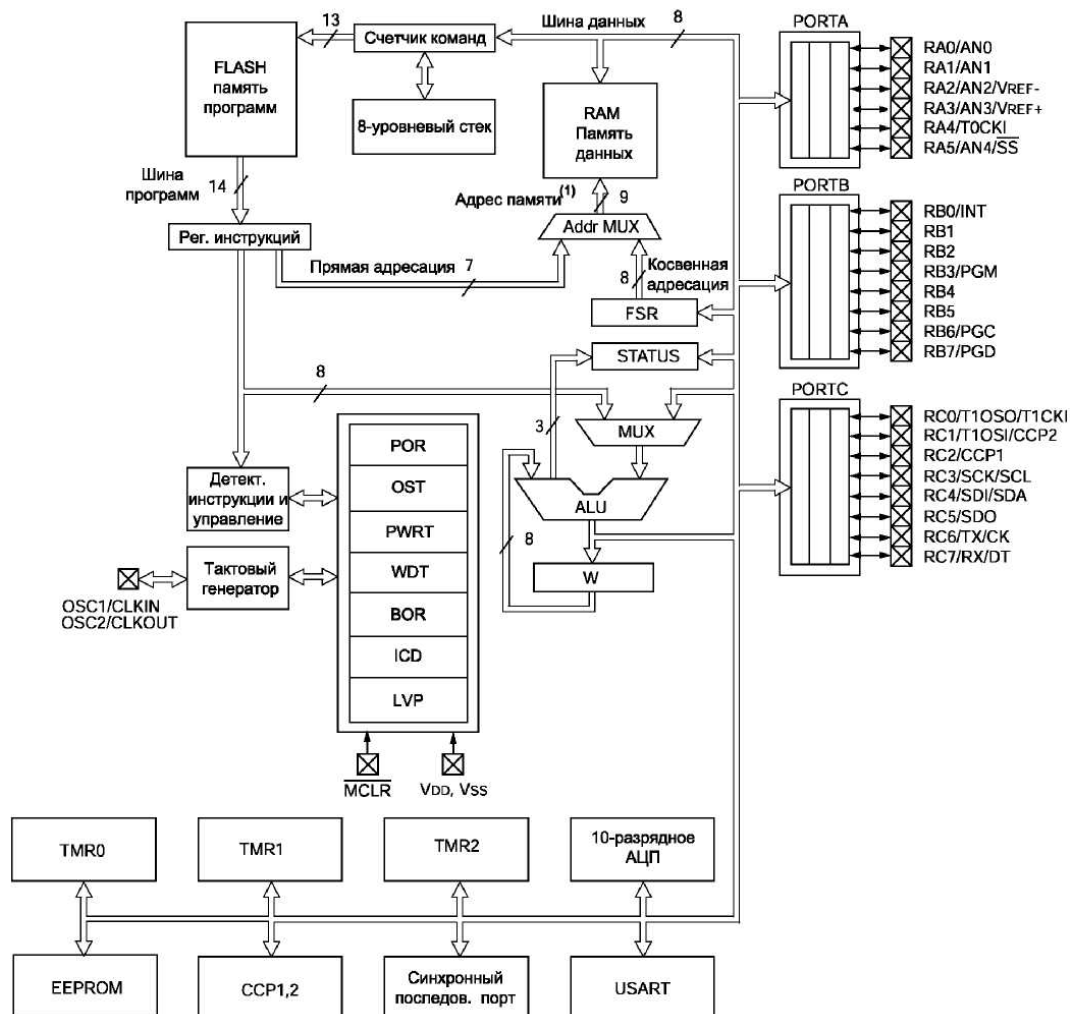


Рисунок 3.14 – Структурна схема мікроконтролера PIC16F877

Для обміну даними між контролерами систем управління та ЕОМ по послідовному інтерфейсу RS-232C використовуються перетворювачі сигналів стандарту TTL у сигнали інтерфейсу RS-232C.

- Сигнали TTL-логіки мають рівні напруг: логічна одиниця — від 2,4 до 5 В, логічний нуль — від 0 до 0,8 В.
- Сигнали RS-232C кодуються напругою від ± 5 до ± 12 В, при цьому логічні 0 та 1 мають однакову амплітуду, але різний знак.

Основою таких перетворювачів є широко застосовувана мікросхема MAX232A фірми MAXIM (див. рисунок 3.15), що має аналоги від інших виробників (ANALOG DEVICES, LG тощо). Мікросхема MAX232A

живиться від напруги 5 В. Вона містить вбудований подвоювач та інвертор напруги, що реалізовані на зовнішніх конденсаторах. Ці схеми формують необхідні напруги ± 10 В для коректної роботи з інтерфейсом RS-232C

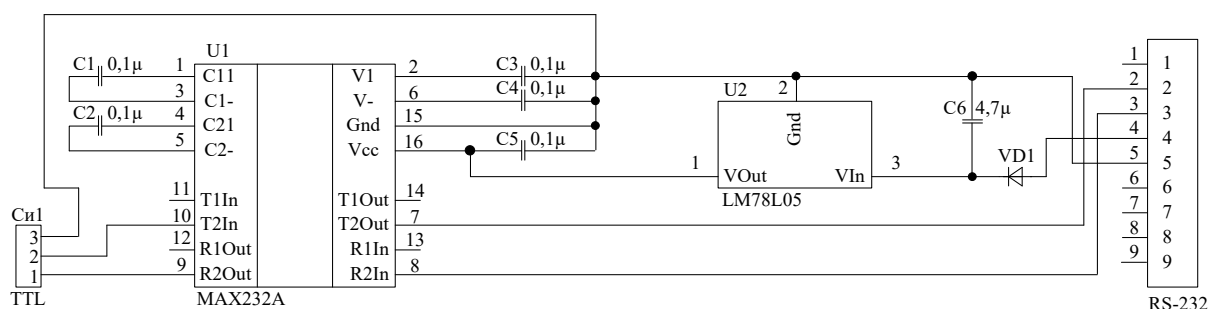


Рисунок 3.15 – Схема перетворювача рівнів напруги TTL в RS- 232с

Для роботи мікросхеми MAX232A необхідно підключити чотири зовнішні конденсатори (C1, C2, C3, C4) ємністю 0,1 мкФ, які використовуються у схемах перетворення напруги.

Для спрощення застосування даного перетворювача передбачена схема живлення безпосередньо від послідовного порту, що усуває потребу в зовнішньому джерелі живлення.

- Напруга живлення 5 В формується малопотужним лінійним стабілізатором LM78L05.
- Вхід стабілізатора підключено до накопичувального конденсатора C6, який заряджається через діод D1 від сигналу Data Terminal Ready (DTR)- четвертий контакт 9-контактного роз'єму RS-232.
- Діод D1 може бути будь-якого типу.
- Для стабільної роботи перетворювача сигнал DTR повинен більшість часу знаходитися в логічному низькому стані (логічний 0). Це має забезпечуватися термінальною або користувацькою програмою.

Для збору і передачі даних між датчиком Q2, встановленим у контрольній точці мережі, у системі управління застосовуються бездротові канали зв'язку з використанням радіомодемів.

- Використовуються радіомодеми РІТАЛІ-1800 ДМ (GSM-модем).

- Передача даних забезпечується завадостійким кодуванням.
- Для захисту інформації від несанкціонованого доступу застосовуються програмні або апаратні засоби обробки.
- До радіомодему можна підключати будь-яке кінцеве або проміжне обладнання, а також різноманітні датчики (вимірювачі тиску, витрати, електроспоживання тощо) через зовнішній блок контролю.

Технічні характеристики радіомодема РІТАЛ-1800 ДМ:

- Максимальна швидкість передачі — 115 200 біт/с по радіоканалу стандарту DECT;
- Максимальна відстань передачі — до 6 км;
- Підключення кінцевого обладнання через інтерфейс RS-232;
- Повнодуплексний режим обміну — одночасна передача і прийом даних на максимальній швидкості;
- Вбудоване програмне забезпечення дозволяє працювати як у режимі «точка-точка», так і «точка-многоточка»;
- Підтримка режиму емуляції Hayes-сумісного модему (керування AT-командами), що дозволяє використовувати програмне забезпечення, призначене для звичайних телефонних модемів.

Технічні характеристики радіомодема наведені в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Технічні характеристики використовуваних модемів

Частотний діапазон	1880 - 1900 МГц
Радіоінтерфейс	DECT
Середня вихідна потужність блока радіоінтерфейса, мВт	10
Напруга живлення блока радіоінтерфейса	220 В, 50 Гц або 9 В

Продовження таблиці 3.16.

Інтерфейс	RS-232
Швидкість передачі даних в каналі (з корекцією помилок), біт/с	115200
Швидкість передачі даних (с корекцією помилок) при обслуговуванні чотирьох сполучень, біт/с	28800
Типова дальність зв'язку (при наявності прямої видимості), км	5
Максимальна дальність зв'язку обмежена (протоколом при наявності прямої видимості), км	7.5

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розглянуто питання охорони праці, що стосуються модернізації електропривода насосного агрегату. Аварії в електричних мережах, а також недотримання правил з їх безпечної експлуатації призводять до серйозної загрози життю та здоров'ю людей через небезпеку падінь з висоти, поранень, опіку, уражень електричним струмом тощо. Крім того, на електротехнічний оперативний персонал, що здійснює монтаж і експлуатацію системи контролю технічного стану насосного агрегату, впливають такі шкідливі виробничі фактори [1, 2]:

- фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

- хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

- фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Під час ремонту та монтажу обладнання системи контролю технічного стану насосного агрегату необхідно вживати заходів із запобігання впливу на працівників визначених вище небезпечних і шкідливих виробничих факторів. За наявності цих факторів, безпека праці під час монтажу та ремонту обладнання електропотяга повинна відповідати вимогам та заходам безпеки, що зазначені в нормативно-правовій документації з охорони праці, зокрема під час виконання робіт: в діючих електроустановках; на висоті; з застосуванням електроінструменту; зварюванні тощо.

Особливу увагу потрібно приділяти убезпеченню працівників під час виконання робіт в діючих електроустановках. Найбільш ефективним засобом захисту працівників є встановлення заземлень. Встановлювати заземлення на струмопровідні частини необхідно безпосередньо після перевірки відсутності напруги. Переносні заземлення спочатку треба приєднати до заземлювального пристрою, а потім, після перевірки відсутності напруги, встановити на струмопровідні частини. Знімати переносне заземлення необхідно в зворотній послідовності: спочатку зняти його зі струмопровідних частин, а потім від заземлювального пристрою.

Встановлення та зняття переносних заземлень слід виконувати в діелектричних рукавичках із застосуванням в електроустановках понад 1000 В ізолювальної штанги. Закріплювати затискачі переносних заземлень слід цією ж штангою або безпосередньо руками в діелектричних рукавичках. Забороняється користуватися для заземлення провідниками, не призначеними для цього, а також приєднувати заземлення за допомогою скручування.

В електроустановках понад 1000 В (підстанції 10/0,4 кВ) заземлювати слід струмопровідні частини всіх фаз (полюсів) відключеної для робіт ділянки з усіх боків, з яких може бути подана напруга, за винятком відключених для робіт збірних шин, на які достатньо встановити одне заземлення. Під час робіт на відключеному лінійному роз'єднувачі на проводи спусків з боку ПЛ, незалежно від наявності заземлювальних ножів, має бути встановлене таке додаткове заземлення, яке не порушується під час виконання операцій з роз'єднувачем.

Заземлені струмопровідні частини мають бути відокремлені від струмопровідних частин, що перебувають під напругою, видимим розривом (вимкненими вимикачами, роз'єднувачами, відокремлювачами або вимикачами навантаження, знятими запобіжниками, демонтованими шинами або проводами). Безпосередньо на робочому місці заземлення додатково встановлюється в тих випадках, коли ці частини можуть опинитися під наведеною напругою (потенціалом), яка може викликати ураження струмом, або коли на них може бути подана напруга понад 42 В змінного і 110 В постійного струму від стороннього джерела.

В електроустановках, конструкція яких така, що встановлення заземлень небезпечне (наприклад, в деяких розподільчих шафах, КРУ окремих типів, збірках з вертикальним розташуванням фаз), під час підготовки робочого місця слід вжити додаткових заходів безпеки, що перешкоджають помилковому поданню напруги до місця роботи: приводи і вимкнені апарати замикаються на замок; на ножі або верхні контакти роз'єднувачів рубильників, автоматів тощо встановлюються гумові ковпаки або спеціальні накладки з ізоляційних матеріалів; запобіжники, ввімкнені послідовно з комутаційними апаратами, знімаються. Ці технічні заходи мають бути вказані в місцевій інструкції з експлуатації. В разі неможливості вжиття зазначених додаткових заходів мають бути від'єднані кінці лінії живлення – в РУ, на щиті, збірці або безпосередньо на місці роботи. Список

таких електроустановок визначається і затверджується особою, відповідальною за електрогосподарство.

Встановлення заземлення не потрібне під час роботи на електроустаткуванні, якщо від нього з усіх боків від'єднані шини, проводи та кабелі, якими може бути подана напруга; якщо на нього не може бути подана напруга зворотною трансформацією або від стороннього джерела і за умови, що на цьому устаткуванні не наводиться напруга. Кінці від'єднаних кабелів в цьому разі мають бути замкнені накоротко і заземлені.

Під час робіт в РУ встановлювати заземлення на протилежних кінцях ліній, що живлять це РУ, не потрібно, крім випадків, коли під час проведення робіт необхідно знімати заземлення з виводів ліній.

В електроустановках до 1000 В під час робіт на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин має бути знята і шини (за винятком шин, що виконані ізолюваним проводом) мають бути заземленими. Необхідність і можливість встановлення заземлення на приєднання цих РУ, щитів, збірок і підключеного до них устаткування визначає особа, яка видає наряд (розпорядження). В електроустановках напругою до 1000 В всі операції зі встановлення і зняття заземлень дозволяється виконувати одній особі з групою III з числа оперативних чи оперативно-ремонтних працівників. Встановлення переносних заземлень у цьому випадку проводиться з землі за умови застосування спеціальної ізолювальної штанги, якою можна не тільки встановлювати, але і закріплювати ці заземлення.

Допускається тимчасове зняття заземлень, встановлених під час підготовки робочого місця, якщо це вимагається характером робіт, що виконуються. Тимчасове зняття і повторне встановлення заземлень виконується оперативним працівником чи (під його наглядом) членом бригади з групою III. Дозвіл на тимчасове зняття заземлень, а також на виконання цих операцій керівником робіт, слід обумовлювати в рядку наряду

«Окремі вказівки» з записом про те, де і з якою метою мають бути зняті заземлення.

4.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання, яке використовується для виконання робіт з монтажу та експлуатації системи контролю технічного стану насосного агрегату, та системи освітлення здійснюється від чотирихпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В). Категорія умов по небезпеці електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю у цехах підвищеної вологості.

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [4, 5]:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [6] нормують допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення. Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [7]:

Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні допустимих параметрів мікроклімату не повинна перевищувати 2°C.

Якщо температура поверхонь вище або нижче допустимої температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м.

Для забезпечення нормованих значень швидкості руху повітря проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [6]. Нормовані параметри забруднення повітря в робочій зоні наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимальна Разова	Середньодобова	
Оксид вуглецю	3	20	4
Пил нетоксичний	4	4	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця [7]. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів з очищення забруднених поверхонь. Потрібно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (менша зернистість), тим вище небезпека.

Тому необхідно здійснювати наступні заходи: очищувати металевий пил якнайчастіше, щодня протирати гарячі поверхні, при високих концентраціях пилу обробляти запилені поверхні по частинам. Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу під час прибирання.

4.2.3 Виробниче освітлення

При поганому освітленні зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків: 5% травм можна пояснити недостатнім освітленням, а у 20% випадків воно сприяло їх появі. Погане освітлення може призвести до професійних захворювань: погіршують загальне самопочуття, зменшують фізичну і розумову працездатність.

Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Допустимі рівні виробничого освітлення наведені в таблиці 4.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп [E27 LED 15W NW A60 "SG"](#). Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованою освітлення		Природнє Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	V	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

4.2.4 Виробничий шум

Нормовані параметри виробничого шуму в робочій зоні наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів

слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.2.5 Виробнича вібрація

На нашому об'єкті присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація, яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання. Нормовані параметри виробничої вібрації в робочій зоні наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	$\frac{1,3^*}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування засобів

індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

4.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують ССБТ «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Типові правила пожежної безпеки для промислових підприємств і інструкції на окремих об'єктах.

Приміщення, де здійснюється експлуатація електропривода насосного агрегату, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії В (пожежонебезпечна) – горючі гази, легкозаймисті, горючі і/або важкогорючі рідини, а також речовини і/або матеріали, як здатні вибухати та горіти або тільки горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря і/або один з одним; тверді горючі і/або важкогорючі речовини та матеріали (включно горючий пил і/або волокна), за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються), не відносяться до категорій А або Б і питома пожежна навантага для твердих і рідких легкозаймистих, горючих та важкогорючих речовин і/або матеріалів на окремих ділянках площею не менше 10 м² кожна перевищує 180 МДж•м-2.

Будівля, де розташоване це приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому

елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горищ і та над підвалами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки				плити, наст-и, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 4.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 5.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.8 (знаменник).

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Таблиця 4.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На території підприємства встановлено 49 вогнегасників ВП-5(8) [16].

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано систему активного регулювання продуктивності насосної станції, що відрізняється енергоефективністю та економічністю. На відміну від традиційного дроселювання та частотного регулювання, використовується спосіб зміни продуктивності насоса через байпасну лінію з гідротурбіною та генератором із системою відбору потужності.

В ході дослідження проаналізовано функціонування водопровідних насосних агрегатів та їх методів регулювання параметрів. Для розглянутої станції проведено розрахунок втрат потужності при дроселюванні та визначено технологічний діапазон регулювання подачі.

Доведено, що при реактивному регулюванні (дросельною заслінкою) виникають значні втрати потужності, які еквівалентні приблизно 350–400 грн на рік. Це обґрунтовує необхідність впровадження більш раціонального способу регулювання, заснованого на активних регулювальних пристроях з турбіною і електромеханічним перетворювачем.

У роботі розглянуто конструкції гідротурбін, напрямних апаратів і регуляторів швидкості. Виконано синтез параметрів системи автоматичного регулювання продуктивності (САРП), проведено розрахунок і вибір гідротурбіни, а також визначено її робочі характеристики для двох способів регулювання потужності.

Виконано розрахунок і вибір асинхронного генератора, розглянуто схеми його збудження.

Для автоматизації технологічного процесу розроблено структурну схему системи активного регулювання, обрано технологічні датчики та необхідне силове обладнання, а також створено алгоритм роботи керуючої програми.

Окремо викладено основні принципи електробезпеки та пожежної безпеки при роботі на насосних установках, виконано розрахунок захисного заземлення.

Отже, розроблена система активного регулювання насосної станції дозволяє:

- здійснювати регулювання подачі в необхідних межах;
- забезпечувати рекуперацію енергії в мережу (до 30 % від встановленої потужності насосного агрегату);
- виконувати плавне управління параметрами роботи;
- підвищувати надійність роботи технологічного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yang, Z., & Li, Y. (2023). Advanced Energy-Efficient Control Strategies for Pumping Stations in Urban Water Supply Systems. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135825. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135825>
2. Kumar, P., Singh, R., & Sharma, A. (2022). Optimization of Pump Performance Using Variable Frequency Drives for Energy Savings. *Renewable Energy*, 181, 381-390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.073>
3. Іванов С.В., Петренко О.М. (2021). Енергозбереження у системах водопостачання з застосуванням гідротурбін. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", Серія: Енергетика та автоматика, 48(3), 34-42. <https://doi.org/10.12345/energy.2021.48.3.34>
4. Chen, X., & Wang, J. (2024). Integration of Hydro Turbines for Energy Recovery in Water Pumping Systems: A Review. *Energy Reports*, 10, 1017-1032. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.014>
Карелин В. Я. Насосы и насосные станции / В.Я. Карелин, А.В. Минаев. – М., 1986, – 340 с.
5. Petrova, N., & Holovko, L. (2020). Сучасні методи автоматизації електроприводів насосних установок. Автоматизація і управління, 41(5), 22-30
6. Garcia, A., & Silva, M. (2023). Smart Pumping Stations: IoT and Control Systems for Efficient Water Management. *Water*, 15(4), 756. <https://doi.org/10.3390/w15040756>.
7. Bideris-Davos A. A. & Vovos P. N. (2024). Comprehensive Review for Energy Recovery Technologies Used in Water Distribution Systems Considering Their Performance, Technical Challenges, and Economic Viability. *Water*, 16(15), 2129
8. Yang Z. & Li Y. (2023). Advanced Energy-Efficient Control Strategies for Pumping Stations in Urban Water Supply Systems. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135825

9. Krishnamoorthy P. et al. (2024). A Smart Pumping System with Intelligent Control Algorithm for Optimizing Energy Efficiency. *International Journal of Scientific Methods in Computational Science and Engineering*, 1(2), 1–10
10. Тинянова І. О., Резвая К. В., Дранковський В. М., Савенков Д. В., Тинянов О. О. Проектування вискоєфективної проточної частини насос-турбіни Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023. DOI: 10.20998/2411-3441.2023.2.05
11. Смоглікова Ю. О., Медведенко О. В. Енергетична ефективність насосних установок водопостачання: досвід Ніжина Фонд Східна Європа, 2023. eef.org.ua
12. Швець О. В., Федоренко І. В. Модернізація насосних станцій водовідведення в м. Хмельницький Європейський Союз, 2023. euneighbourseast.eu
- 13 ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
14. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
15. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644.
16. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

17. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
18. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
19. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
20. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
21. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
22. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
23. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
24. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
25. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
26. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
27. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
28. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. Микола МОШНОРИЗ

“ 04.” Березня 2025 р.

Технічне завдання

на бакалаврську кваліфікаційну роботу

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВОДОПРОВІДНОГО
НАСОСНОГО КОМПЛЕКСУ

08-24.БКР.030.00.000 ТЗ

Керівник роботи

“ 04.” Березня 2025 р. к.т.н., ст.викл. В.С. Бомбик

Виконав студ. гр. ЕМСА-23мс

“ 04.” Березня 2025 р. Тимофій ПАЛЯНИЦЯ

Вінниця ВНТУ 2025

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Модернізація електропривода водопровідного насосного комплексу».

Скорочене найменування розробки – «Електропривод водопровідного насосного комплексу».

Замовник – кафедра Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем дипломних проектів.

3 Призначення розробки і галузь використання

Електропривод водопровідного насосного комплексу призначений для активного регулювання продуктивності насосної станції другого підйому міської системи водопостачання м. Вінниці.

Галузь використання – житлово-комунальний комплекс.

4 Вимоги до розробки

Електропривод водопровідного насосного комплексу повинен забезпечувати надійність подачі води для другого підйому. Повинна бути енергоефективність та продуктивність на високому рівні. Забезпечення безпеки й екологічності проекту.

5 Комплектація розробки

Електропривод електропривода складається з електродвигуна, системи керування, системи комутації та захисту.

6 Технічні характеристики

Тип насоса	Подача, м ³ /год	Напір, м вод.ст	Потужність двигуна, кВт	Частота обертання, об/хв
Насос 1 14Д-6а	1500	90	500	1480
Насос 2, 3, 4 Д1250-125	1250	125	630	1485
Насос 7 3В200×2	400-500	95	200	1470
Насос 8, 9, 10 Д2000-100	2000	100	800	980
Насос 12 Д3200-75	3200	75	800	980

7 Елементна база

Двигун, апаратура управління і захисту, провідники, кабелі і т.п. виробництва України чи європейських країн.

8 Конструктивне виконання

Електропривод виготовляється окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки.

9 Показники технологічності

Автоматизований електропривод виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, струмопроводи повинні відповідати правилам влаштування електроустановок.

10 Технічне обслуговування та ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками та

слюсарями відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється один раз на тиждень. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електроприводу.

11 Живлення електропривода

Живлення системи електропривода повинне бути виконане напругою 0,4 кВ.

12 Джерела розробки

1) Bideris-Davos A.A., Vovos P.N. Comprehensive Review for Energy Recovery Technologies Used in Water Distribution Systems // Water, 2024, Vol. 16, Issue 15, Article 2129. DOI: 10.3390/w16152129.

2) Zhang Y., Wang Z., Wang S., et al. Pumps as turbines for efficient energy recovery in water supply systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, Vol. 81, pp. 1650–1663. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.067.

3) Rossi A., Smith J. Pump as Turbine for Energy Recovery in a Water Distribution System: Case Study // Energies, 2020, Vol. 13, Issue 8, Article 1908. DOI: 10.3390/en13081908.

Додаток Б

Часові діаграми усередненого річного та сезонного добового зміни витрати води в мережі водопостачання

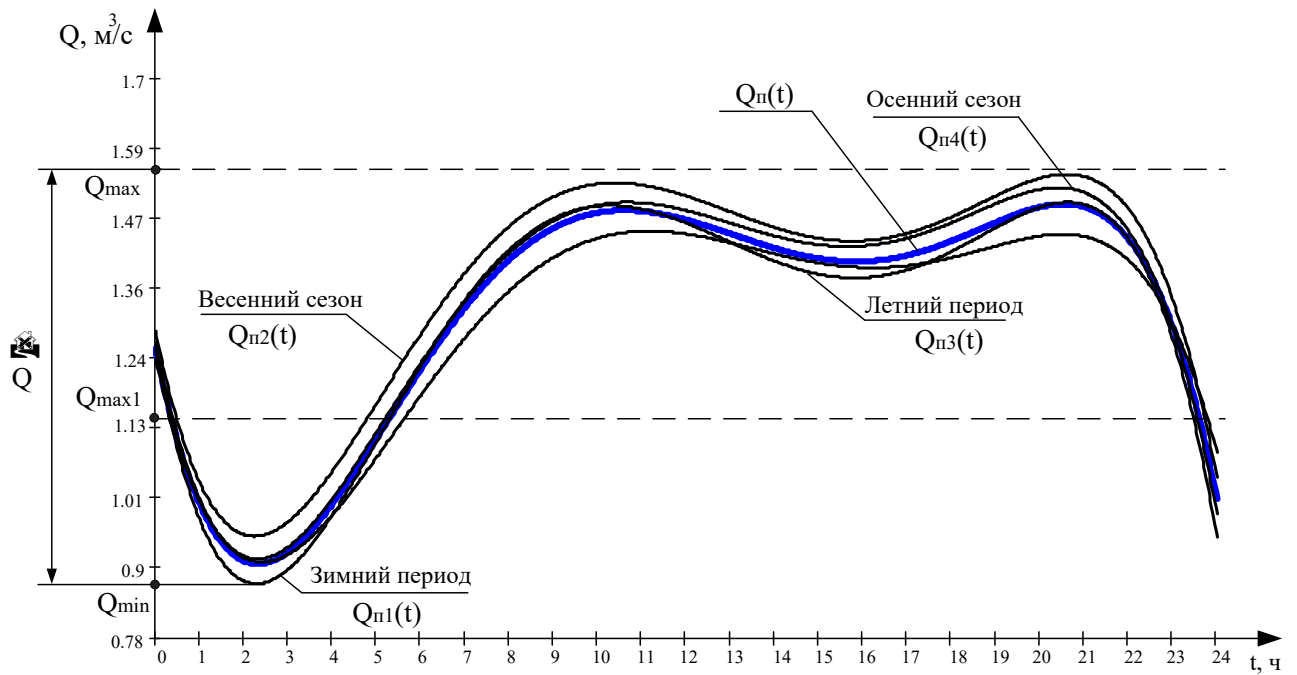


Рисунок Б.1 – Графік міського водоспоживання:

На рисунку Б.1: Q_{min} — мінімальна продуктивність НС; Q_{max1} — максимальна продуктивність одного насоса; Q_{max} — максимальна продуктивність НС.

Додаток В

Структурна схема системи керування насосним комплексом

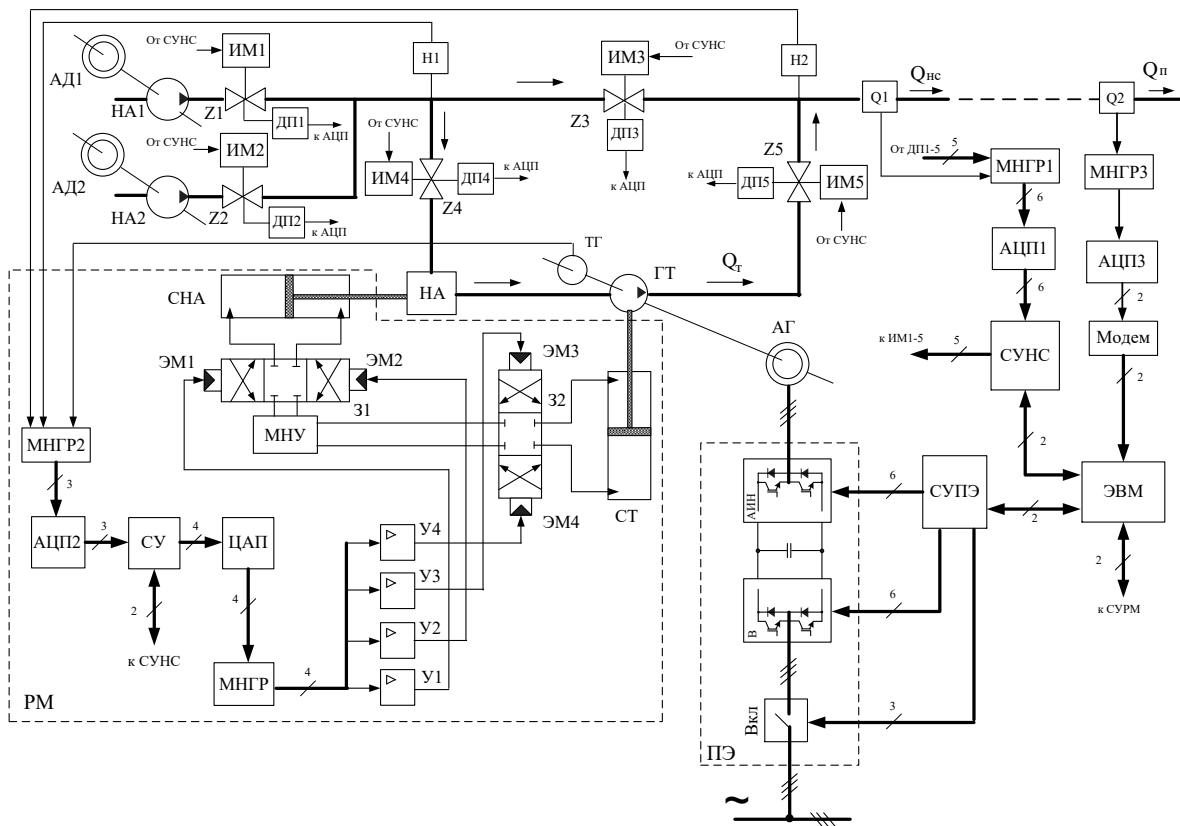


Рисунок В.1 – Структурна схема системи керування насосним комплексом

На рисунку В.1: НА1-2 – насоси; АД1-2 – асинхронні двигуни; Z1-5 – засувки; ДП1-5 – датчики положення засувки; ІМ1-5 – виконавчі механізми засувки; Н1-2 – датчики тиску; Q1-2 – датчики витрати; АЦП1-3 – аналого-цифрові перетворювачі; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ЕМ1-4 – електромагніти; З1-2 – золотники; СНА – сервопривід направляючого апарату; СТ – сервопривід турбіни; МНГР1-3 – модулі нормалізації і гальванічної розв'язки; У1-4 – підсилювачі; ГТ – гідравлічна турбіна; НА – направляючий апарат; РМ – регулятор потужності; АГ – асинхронний генератор; ПЭ – перетворювач енергії; АІН – автономний інвертор напруги; В – випрямляч; Вкл – вимикач; ЕОМ – електронно-обчислювальна машина.

Додаток Г Протокол перевірки кваліфікаційної роботи

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Модернізація електропривода водопровідного насосного комплексу

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-23мс

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 4.52%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Бомбик В.С.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Паляниця Т.О.

(прізвище, ініціали)

Додаток Д
Ілюстративні матеріали

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і
комплексів

Модернізація електропривода водопровідного насосного комплексу

Студент гр. ЕМСА-23мс Тимофій ПАЛЯНИЦЯ.
Науковий керівник: к.т.н., ст.викл. Бомбик В.С.

Модернізація електропривода водопровідного насосного комплексу є важливим напрямом підвищення енергоефективності та надійності систем водопостачання. У зв'язку зі зростанням вартості енергоносіїв, зношеністю обладнання та вимогами до автоматизації, оновлення електроприводів дозволяє зменшити енергоспоживання, підвищити стабільність подачі води та знизити експлуатаційні витрати. Така модернізація сприяє сталому розвитку інфраструктури й відповідає сучасним технічним та екологічним вимогам.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення надійності роботи насосної установки.

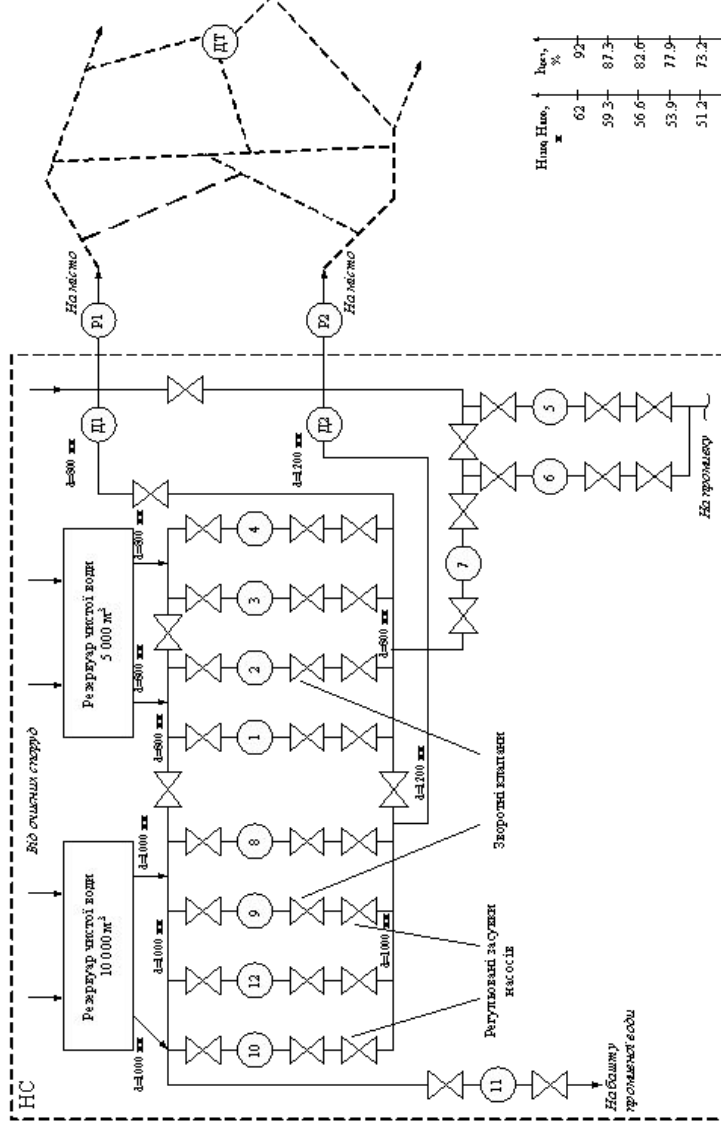
Об'єкт дослідження - водопровідний насосний комплекс, що забезпечує транспортування води в системі водопостачання.

Предмет дослідження - процеси керування та функціонування електроприводів насосів у складі водопровідного комплексу, а також технічні рішення щодо їх модернізації.

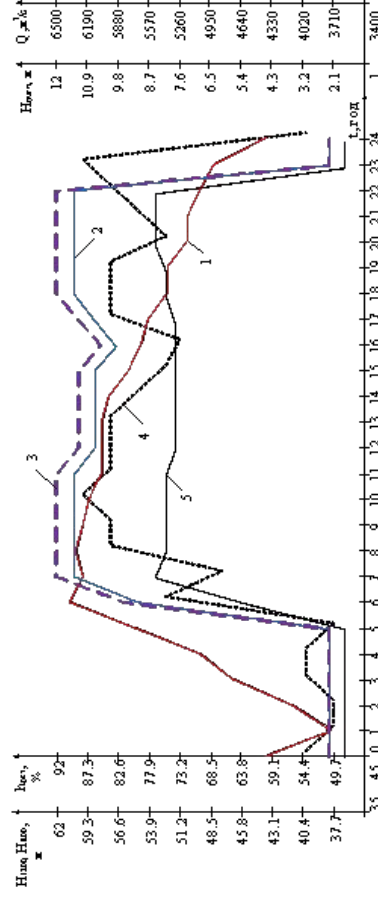
Задачі дослідження:

- 1) Проаналізувати існуючий стан електропривода насосного комплексу та виявити його недоліки.
- 2) Дослідити сучасні технології регулювання електроприводів насосних агрегатів.
- 3) Розробити технічне рішення щодо модернізації електропривода з урахуванням вимог до економічності, надійності та автоматизованого керування.
- 4) Запропонувати заходи з охорони праці та електробезпеки при експлуатації модернізованого обладнання

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОПРОВІДНОГО НАСОСНОГО КОМПЛЕКСУ



Технологічна схема НС II -го підйому



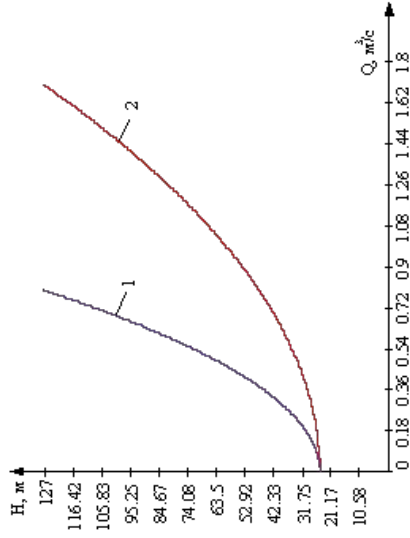
Графіки зміни технологічних параметрів системи водопостачання:

- 1 - зміна рівня води в резервуарі НС;
- 2, 3 - зміна напору в трубопроводах 1200 і 800 мм відповідно;
- 4 - зміна напору в контрольній точці мережі;
- 5 - зміна продуктивності на виході НС

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОПРОВІДНОГО НАСОСНОГО КОМПЛЕКСУ

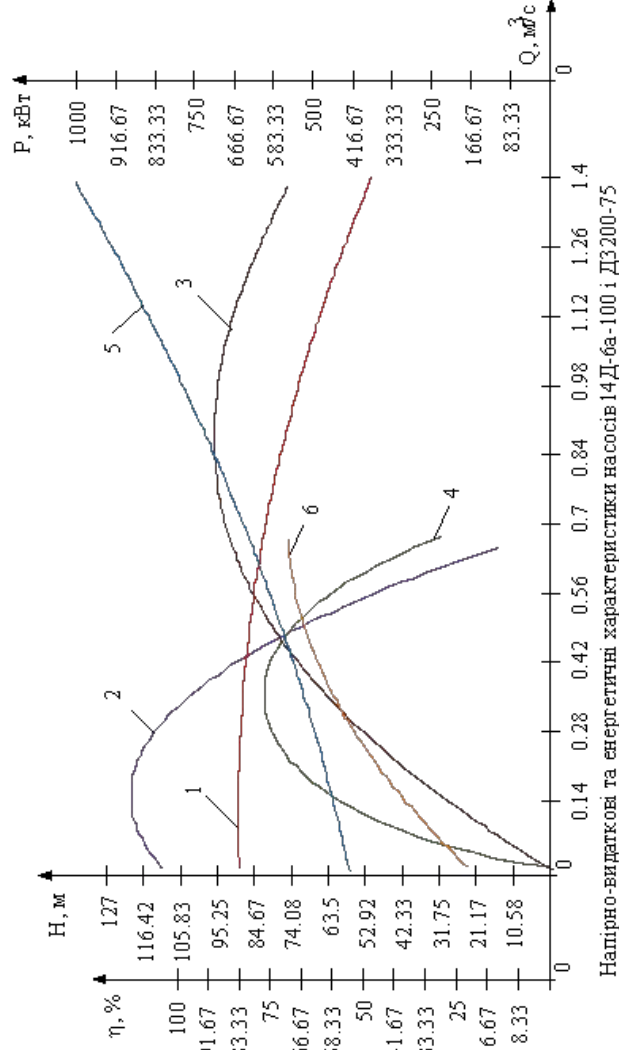
Обладнання, яке використовується на НС

Тип насоса	Подача, м ³ /год	Напор, м вод. ст	Потужність двигуна, кВт	Частота обертання, об/хв
Насос 14Д-6а	1500	90	500	1480
Насос Д2000-100	2000	100	800	980



Н-Q характеристики трубопроводів НС II-го підйому

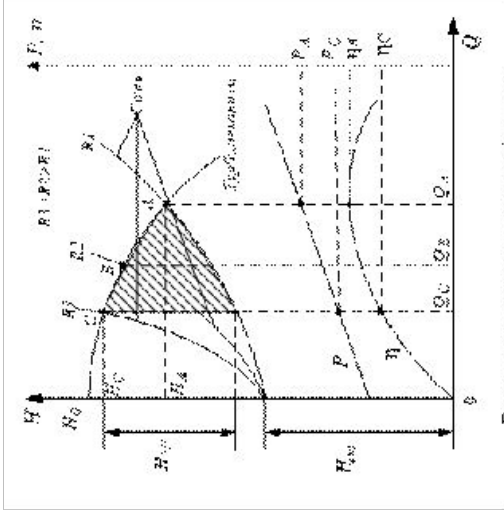
- 1 – Н-Q характеристика трубопроводу діаметром 800 мм;
2 – Н-Q характеристика трубопроводу діаметром 1200 мм



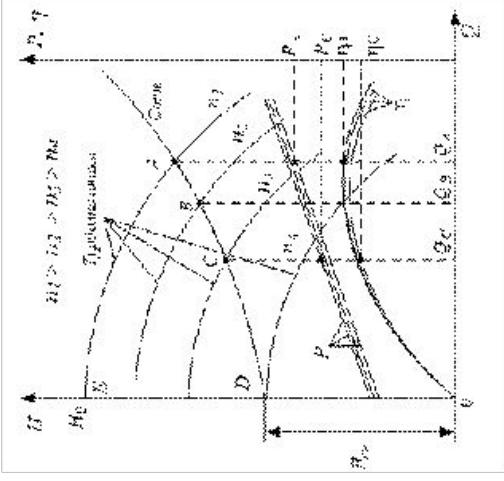
Напірно-видаткові та енергетичні характеристики насосів 14Д-6а-100 і Д3200-75

- 1 – характеристика Q-H насоса Д3200-75;
2 – характеристика Q-H насоса 14Д-6а;
3 – залежність η-Q насоса Д3200-75;
4 – залежність η-Q насоса 14Д-6а;
5 – залежність P-Q насоса Д3200-75;
6 – залежність P-Q насоса 14Д-6а
- Робота НУ з двома паралельно включеними агрегатами на мережу з постійними параметрами
- 1, 2 – напірно-витратні характеристики насосів 1 і 2;
3 – сумарна напірно-видаatkova характеристика насосів;
4 – сумарна характеристика мережі з протитиском

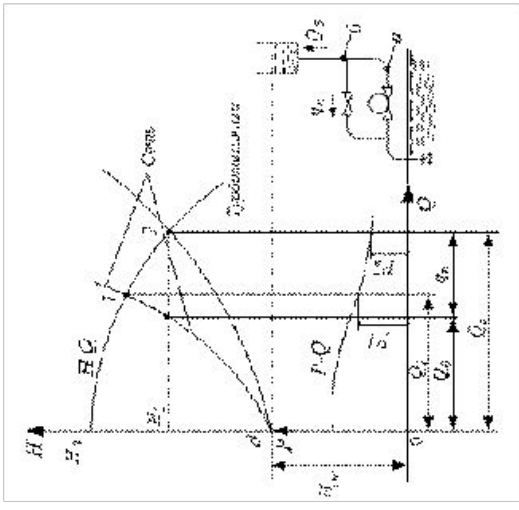
СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ



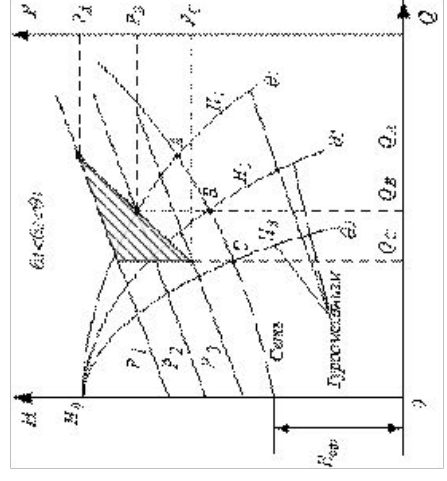
Регулювання продуктивності насоса кросеюванням



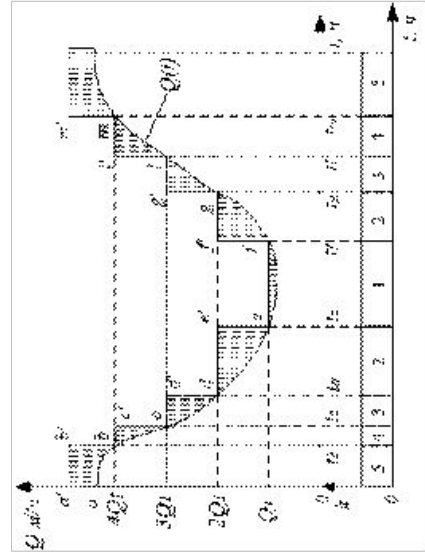
Регулювання продуктивності НА частотою обертання



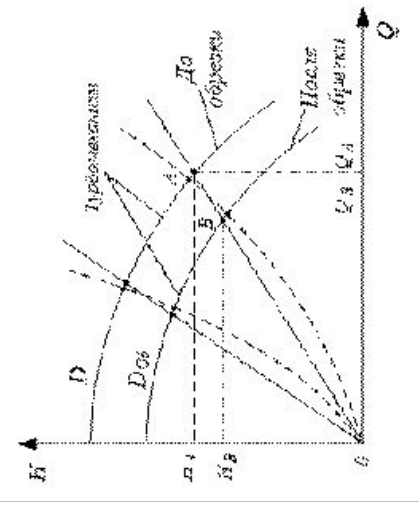
Регулювання перепуском частини рідини, що подається



Регулювання продуктивності зміною кута установки лопатей робочого колеса

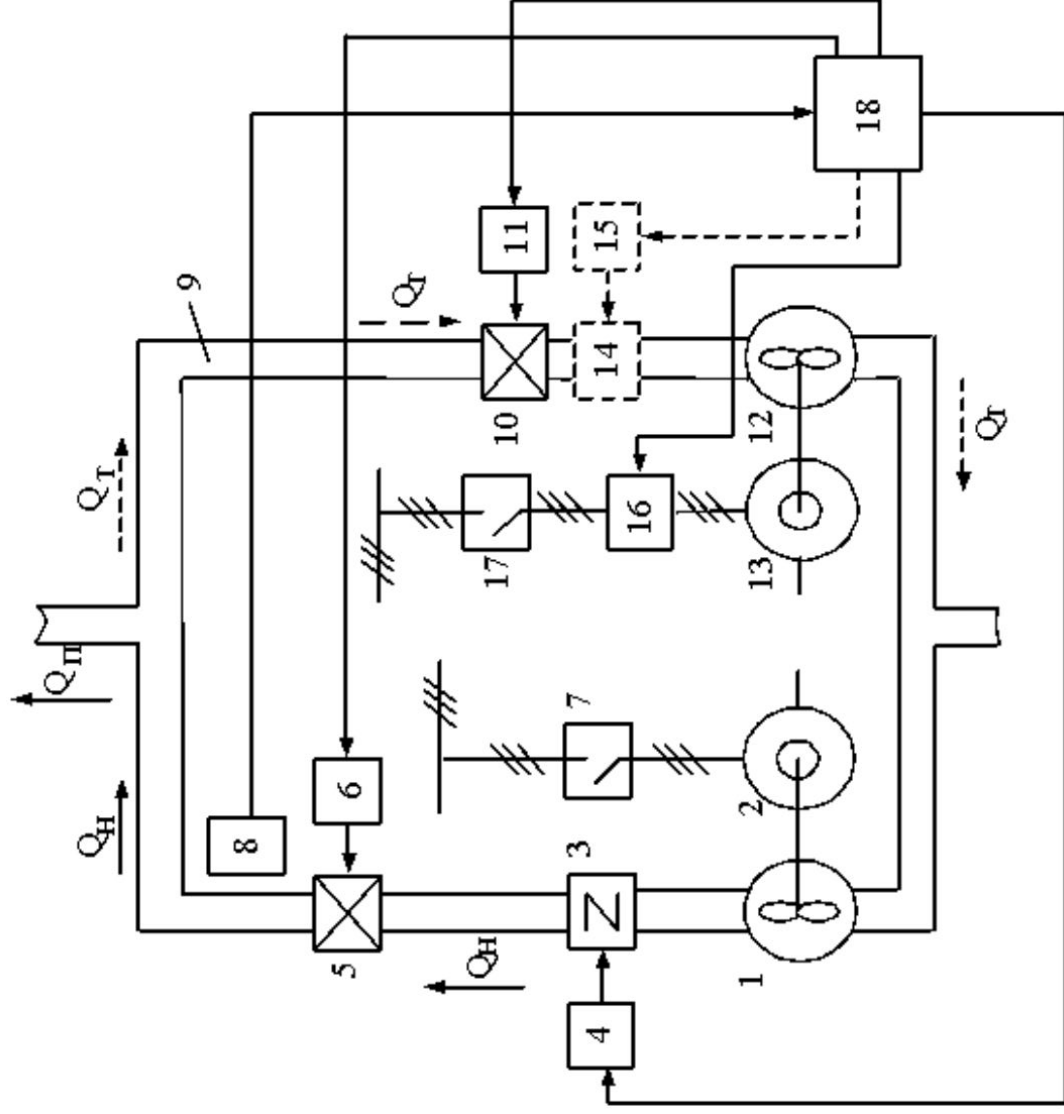


Графіки зміни в часі продуктивності паралельно працюючих турбомеханізмів та графіки необхідної продуктивності

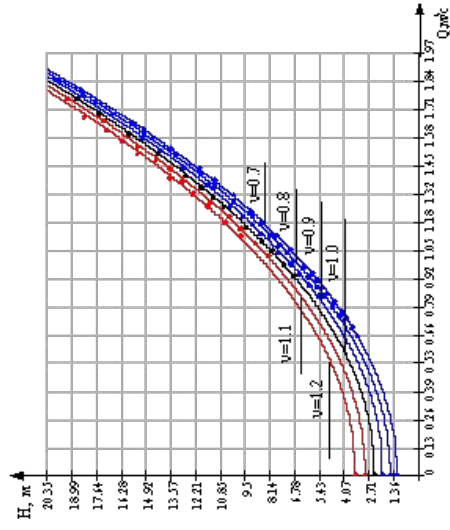


Зміна характеристики насоса залежно від діаметра робочого колеса

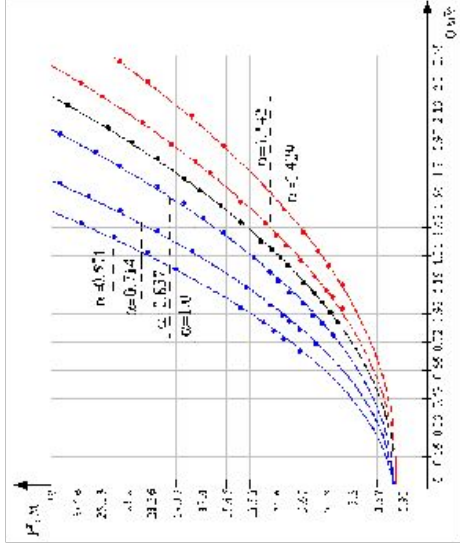
Функціональна схема пристрою захисту насосної установки від гідродудару на основі САРП



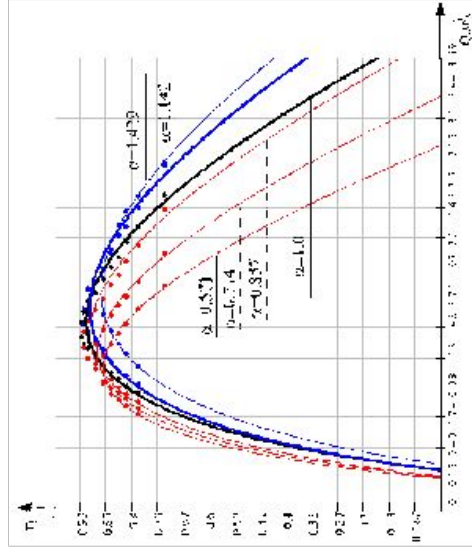
НАПІРНО-ВИТРАТНІ (Н-Q) І ЕНЕРГЕТИЧНІ (Р-Q, η-Q) ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВОРТНОЛОПАТНОЇ ГІДРОТУРБИНИ



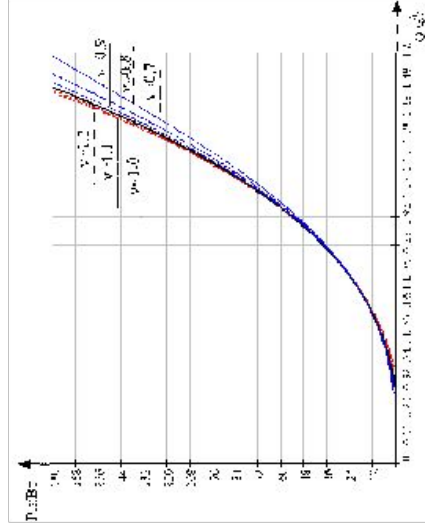
Напірно-витратні Н-Q характеристики поворотлопатної гідротурбини при змінному відкритті направляючого апарату і фіксованому напрямку напрямного апарату



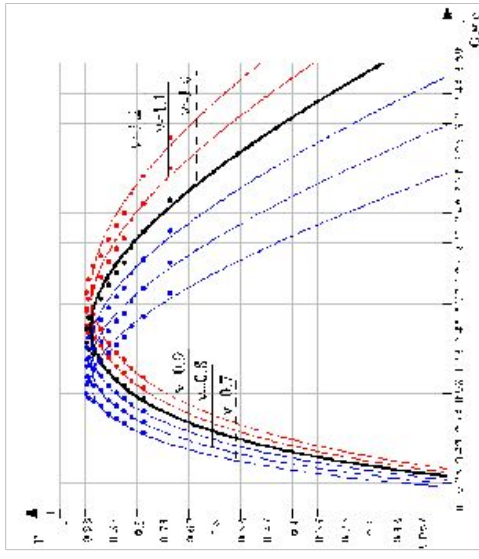
Напірно-з витратами Н-Q характеристики поворотлопатної гідротурбини при змінному відкритті направляючого апарату і постійній швидкості обертання



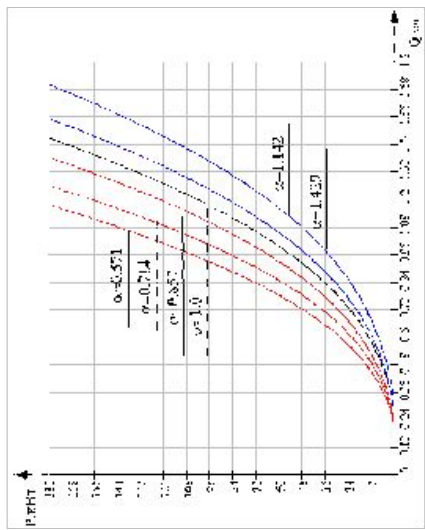
Енергетичні η-Q характеристики поворотлопатної гідротурбини при змінному відкритті направляючого апарату і постійній швидкості обертання



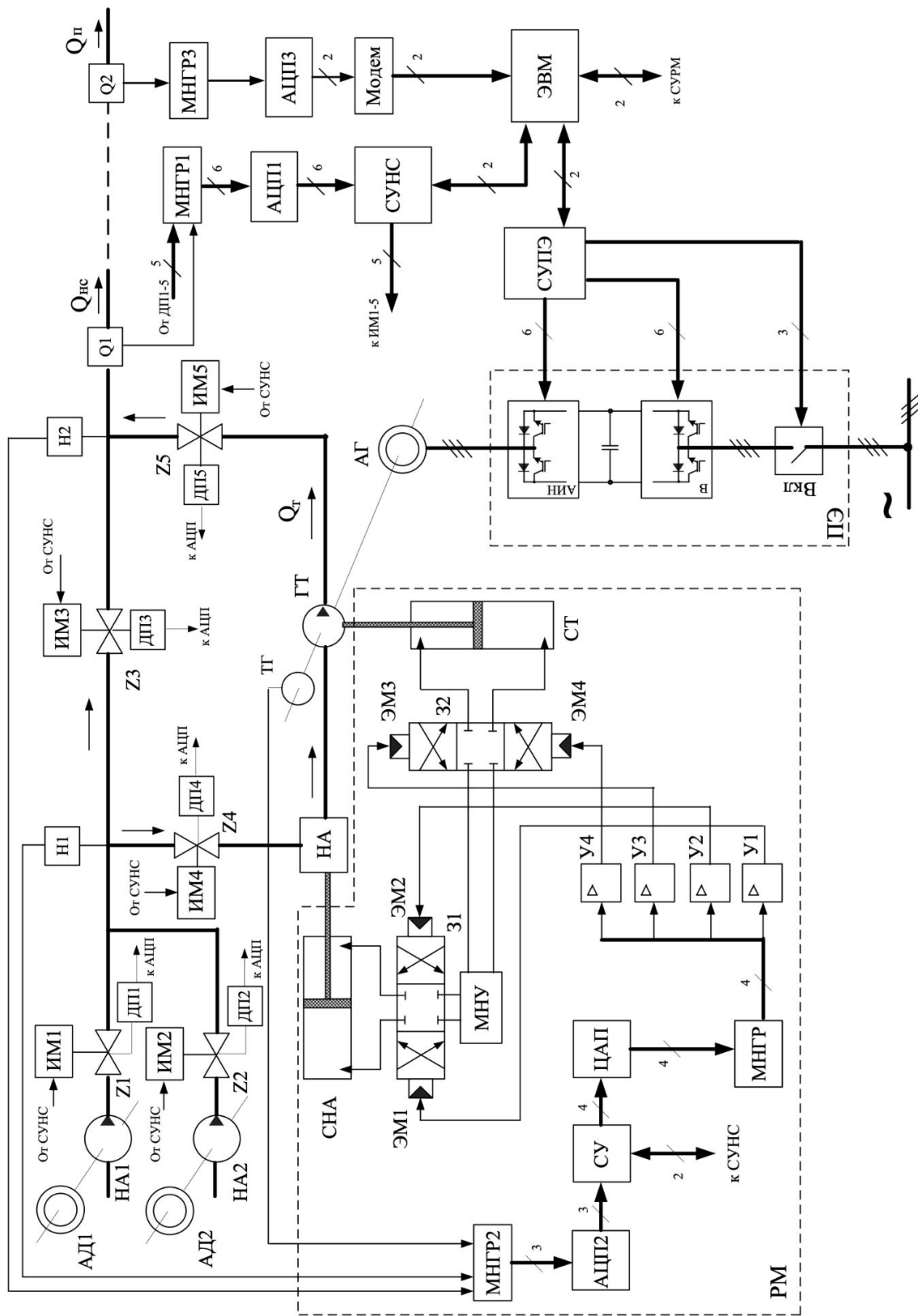
Енергетичні Р-Q характеристики поворотлопатної гідротурбини при змінному відкритті направляючого апарату і постійній швидкості обертання



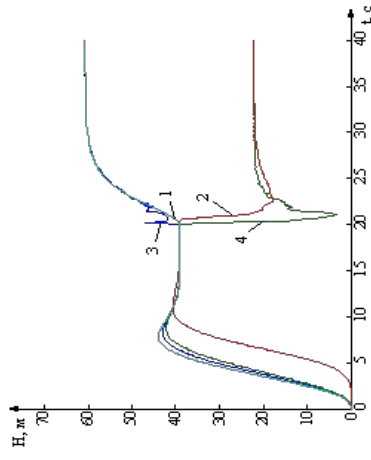
Енергетичні η-Q характеристики поворотлопатної гідротурбини при змінному відкритті направляючого апарату і фіксованому напрямку напрямного апарату



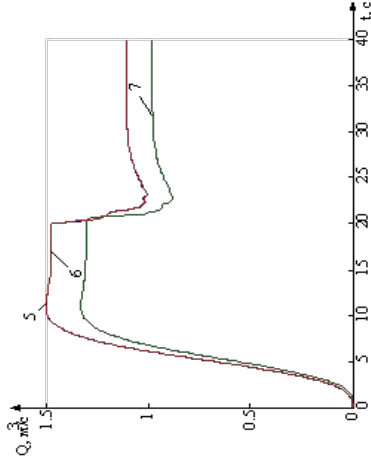
Енергетичні Р-Q характеристики поворотлопатної гідротурбини при змінному відкритті направляючого апарату і постійній швидкості обертання



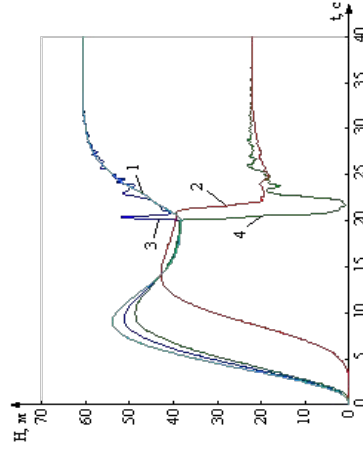
ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ ВОДОПОСТАЧАННЯ ПРИ СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ ДРОСЛЮВАННІ НАПОРУ ЗАСУВКОЮ



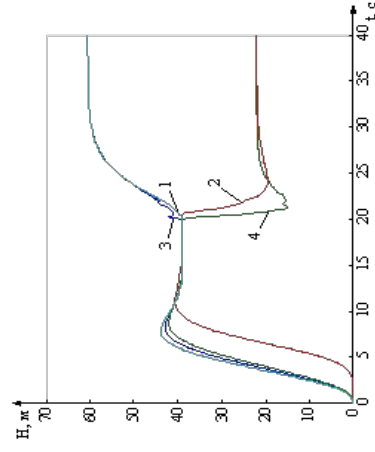
Графіки зміни в часі напору при управлінні засувкою



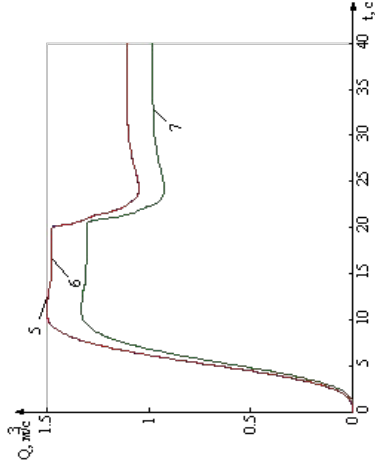
Графіки зміни в часі витрати при управлінні засувкою



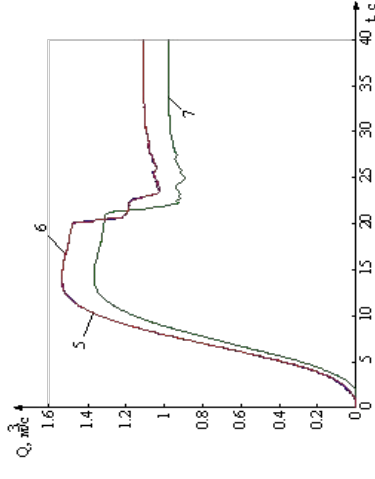
Перехідні процеси напору при збільшенні протяжності трубопроводної мережі



Графіки зміни в часі напору при управлінні засувкою



Графіки зміни в часі витрати при управлінні засувкою



Перехідні процеси витрати при збільшенні протяжності трубопроводної мережі

Насос: 1 – напір; 5 –

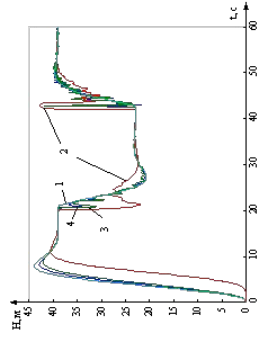
продуктивність

Засувка: 3 – напір на вході; 4 – напір на

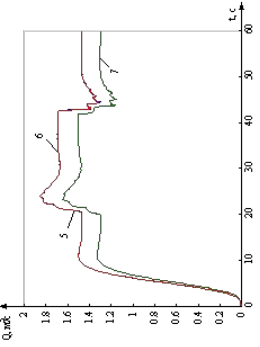
виході

6 –

Дослідження впливу режимів роботи споживача на процеси, що протікають в трубопровідній магістралі при зміні його гідравлічного опору

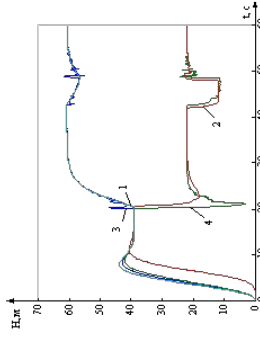


Вплив зміни опору споживача на перехідні процеси напору в трубопровідній мережі при стаціонарних режимах

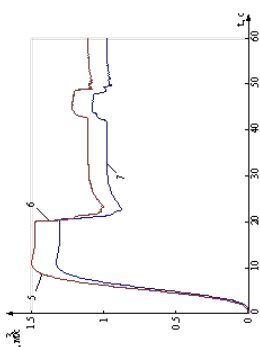


Вплив зміни опору споживача на перехідні процеси витрати в трубопровідній мережі при стаціонарних режимах

Дослідження зміни напору і витрати на виході насоса, в трубопроводі і у споживача за наявності регульовальної засувки в гідромережі

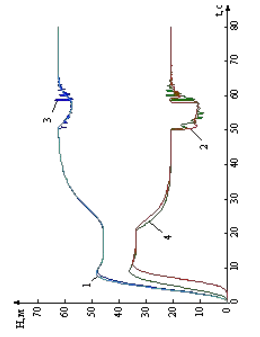


Вплив обурення з боку споживача на напір в трубопровідній мережі за наявності засувки

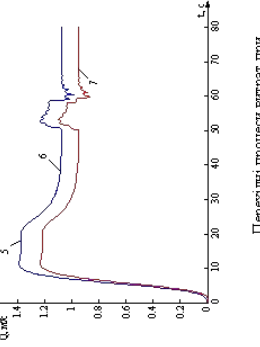


Вплив обурення з боку споживача на витрати в трубопровідній мережі за наявності засувки

Дослідження перехідних процесів за наявності гідротурбіни в мережі



Перехідні процеси напору при наявності гідротурбіни в мережі



Перехідні процеси витрати при наявності гідротурбіни в мережі

Висновки

У роботі запропоновано систему активного регулювання продуктивності насосної станції, що відрізняється енергоефективністю та економічністю. На відміну від традиційного дроселювання та частотного регулювання, використовується спосіб зміни продуктивності насоса через байпасну лінію з гідротурбіною та генератором із системою відбору потужності.

В ході дослідження проаналізовано функціонування водопровідних насосних агрегатів та їх методів регулювання параметрів. Для розглянутої станції проведено розрахунок втрат потужності при дроселюванні та визначено технологічний діапазон регулювання подачі.

Доведено, що при реактивному регулюванні (дросельною заслінкою) виникають значні втрати потужності, які еквівалентні приблизно 350–400 грн на рік. Це обґрунтовує необхідність впровадження більш раціонального способу регулювання, заснованого на активних регулювальних пристроях з турбіною і електромеханічним перетворювачем.

У роботі розглянуто конструкції гідротурбін, напрямних апаратів і регуляторів швидкості. Виконано синтез параметрів системи автоматичного регулювання продуктивності (САРП), проведено розрахунок і вибір гідротурбіни, а також визначено її робочі характеристики для двох способів регулювання потужності.

Виконано розрахунок і вибір асинхронного генератора, розглянуто схеми його збудження.

Для автоматизації технологічного процесу розроблено структурну схему системи активного регулювання, обрано технологічні датчики та необхідне силове обладнання, а також створено алгоритм роботи керуючої програми.

Окремо викладено основні принципи електробезпеки та пожежної безпеки при роботі на насосних установках, виконано розрахунок захисного заземлення.

Отже, розроблена система активного регулювання насосної станції дозволяє:

- здійснювати регулювання подачі в необхідних межах;
- забезпечувати рекуперацію енергії в мережу (до 30 % від встановленої потужності насосного агрегату);
- виконувати плавне управління параметрами роботи;
- підвищувати надійність роботи технологічного обладнання.

08-24.БКР.030.00.000

Вм. Арк. № докумен.	Підпис	Дата
Розробив:	Паляниця Т.О.	20.05
Перевішив	Бомбик В.С.	20.05
Г. контр.		
Реценз.	Габенко О.В.	20.06
Норм. кон.	Бомбик В.С.	20.06
Ватверд.	Мошніков	20.06

Модернізація електропривода
водопровідного насосного комплексу

Літ.			Маса	Масштаб
Аркуш 1			Аркушів 1	
ВНТУ, гр. ЕМСА-23мс				