

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут  
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

**Завідувач кафедри**

  
(підпис)

**Інна НЕФЬОЛОВА**  
(ім'я, прізвище)

«05» чрудня 2024 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)**

рівень вищої освіти другий (магістерський)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

освітньо-професійна Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

тема «Синтез електромеханічної системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна із частотним перетворювачем та ланкою постійного струму»

**Виконав(ла)**

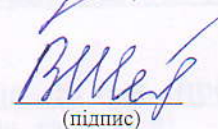
здобувач(ка) групи БД-П23МГ  
(шифр групи)

Данило СІДАШ  
(ім'я, прізвище)

  
(підпис)

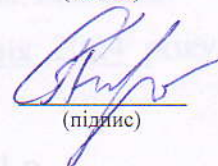
**Керівник роботи**

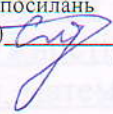
д.т.н., проф. Валентина ШЕВЧЕНКО  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

  
(підпис)

**Рецензент роботи**

к.т.н., доц. Ольга ЧОРНА  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

  
(підпис)

Засвідчую, що у цій роботі немає цитат та вилучень з праць інших авторів без відповідних посилань  
здобувач (ка)   
(підпис)

Харків – 2024

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет/ІННІ Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут

Кафедра Електромеханічних та комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інна НЕФЬОДОВА

(підпис)

(ім'я, прізвище)

«08» жовтня 2024 року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)

Сідаш Данило Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Синтез електромеханічної системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна із частотним перетворювачем та ланкою постійного струму

керівник роботи Шевченко Валентина Володимирівна, д. т. н., професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «08» жовтня 2024 року № 5101-5/3236

2. Строк подання здобувачем роботи «02» грудня 2024 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити: В пояснювальній записці необхідно відобразити аналітичний огляд та опис технологічного процесу, формулювання вимог до електроприводу, енергосиловий розрахунок параметрів технологічного об'єкта, обґрунтування вибору потужності двигуна, вибір електродвигуна та силового електрообладнання, математична модель електромеханічного об'єкта, розрахунок статичних та динамічних параметрів електроприводу, синтез системи керування та дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи шляхом моделювання.

## 4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел, нових розробок, опублікованих даних та іншої інформації, пов'язаної з темою роботи
2	Обґрунтування теоретичної бази обраної проблеми.
3	Характеристика об'єктів галузі: стан і стратегії розвитку
4	Дослідження синтезу електромеханічної системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна із частотним перетворювачем та ланкою постійного струму
5	Розробка електромеханічної системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна із частотним перетворювачем та ланкою постійного струму
6	Оформлення першого варіанту тексту, подання його на ознайомлення науковому керівнику
7	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення дипломної роботи
8	Подання роботи на кафедру, перевірка на плагіат та зовнішнє рецензування роботи
9	Захист дипломної роботи у ЕК

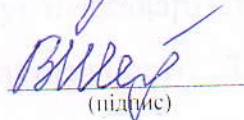
5. Дата видачі завдання «08» жовтня 2024 р.

Здобувач(ка)

  
(підпис)

Данило СІДАШ  
(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

  
(підпис)

Валентина ШЕВЧЕНКО  
(ім'я, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

У роботі було здійснено математичну формалізацію принципів енергоефективного управління коефіцієнтом корисної дії (ККД), а також розроблено відповідні математичні моделі для асинхронних двигунів. На основі цих моделей створено електромеханічні системи автоматичного керування, які забезпечують суттєве підвищення енергоефективності в порівнянні з існуючими методами управління.

Розроблені енергоефективні регулятори можуть досягти економії електроенергії до 33%, що є значним показником у контексті зростаючих витрат на енергію. Важливо зазначити, що ця енергоефективність досягається навіть у присутності різноманітних збурень у системі, що свідчить про robustness (стійкість) запропонованих рішень в умовах, які не завжди ідеальні.

Крім того, були розроблені оцінювачі ККД, які дозволяють суттєво зменшити кількість датчиків, необхідних для роботи системи. Це не тільки спрощує систему, але й значно знижує її собівартість, особливо в випадках, коли мова йде про регулювання продуктивності. Таке зменшення витрат на обладнання робить автоматизовані системи ще більш привабливими для промисловості в умовах конкуренції, де енергоефективність і економія ресурсів стають ключовими факторами успіху.

Отже, результати даної роботи відкривають нові можливості для впровадження енергоефективних технологій у різних галузях виробництва, сприяючи зменшенню витрат на енергоресурси та підвищенню конкурентоспроможності підприємств.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, РЕГУЛЯТОР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

## ABSTRACT

The paper provides a mathematical formalization of the principles of energy-efficient control of the efficiency coefficient (ECC), and also develops appropriate mathematical models for asynchronous motors. Based on these models, electromechanical automatic control systems have been created that provide a significant increase in energy efficiency compared to existing control methods.

The developed energy-efficient controllers can achieve electricity savings of up to 33%, which is a significant indicator in the context of growing energy costs. It is important to note that this energy efficiency is achieved even in the presence of various disturbances in the system, which indicates the robustness of the proposed solutions in conditions that are not always ideal.

In addition, efficiency estimators have been developed that allow a significant reduction in the number of sensors required for the system to operate. This not only simplifies the system, but also significantly reduces its cost, especially in cases where it comes to regulating performance. Such a reduction in equipment costs makes automated systems even more attractive to industry in a competitive environment where energy efficiency and resource conservation are key success factors.

Therefore, the results of this work open up new opportunities for the implementation of energy-efficient technologies in various industries, contributing to the reduction of energy costs and increasing the competitiveness of enterprises.

ENERGY-EFFICIENT CONTROL, ELECTROMECHANICAL SYSTEMS,  
AUTOMATIC CONTROL, REGULATOR, ENERGY EFFICIENCY

## ВСТУП

Автоматизація процесів забезпечує швидше та точніше виконання технологічних операцій. При повній автоматизації участь людини зводиться до мінімуму, адже її роль полягає переважно в спостереженні та корекції. На сьогоднішній день найбільш доцільним є використання мікропроцесорних систем, зокрема програмованих контролерів. Це дозволяє перейти від жорсткої логіки до програмного управління, що, в свою чергу, підвищує надійність і гнучкість системи.

Серед основних вимог до системи автоматичного керування можна виділити кілька ключових аспектів. По-перше, важливо забезпечити плавний пуск і розгін до заданої швидкості. По-друге, необхідно підтримувати максимально можливий коефіцієнт корисної дії (ККД) при зміні параметрів системи. Також важливо стабілізувати витрати в системі шляхом регулювання швидкості обертання електродвигуна. Автоматичне повторне включення після зникнення напруги живлення є ще одним важливим аспектом, поряд із захистом від теплових перевантажень приводних двигунів. Діапазон регулювання швидкості має становити від трьох до одного.

Після проведення розрахунків потужності для приводного двигуна було обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А315S2У3, відповідно до отриманих значень. Для цього двигуна також були побудовані статичні характеристики, які дозволяють відстежувати зміни робочої точки при варіюванні технологічних параметрів або частоти обертання асинхронного двигуна.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Сучасний насосний комплекс є складною електромеханічною системою, що включає в себе електромеханічні та електричні перетворювачі енергії, турбомеханізми, гідравлічну мережу та споживачів. Впровадження перетворювачів частоти в ці системи дозволяє досягати до 40% економії електроенергії в порівнянні з нерегульованими електроприводами. Найвищі показники енергоефективності досягаються, коли робоча точка насосу розташована в околі максимального коефіцієнта корисної дії (ККД) насосу. Однак під час роботи насосу ця точка може значно відхилитися від оптимальної зони через варіації певних параметрів, що призводить до зниження ККД насосу і, відповідно, енергоефективності всієї системи. Основні труднощі у створенні вискоелективних енергозберігаючих систем пов'язані зі складністю їх структури, просторовим розподілом, змінними параметрами, а також можливістю раптових змін величини завдання з дискретного на неперервне і навпаки. Системи водопостачання зазвичай розробляються для задоволення постійно зростаючих потреб населення та промисловості, що призводить до неоптимальної структури мережі, яка не містить вичерпної інформації про всі її параметри. Регулювання тиску чи витрат водопостачання може здійснюватися шляхом зміни гідравлічного опору мережі, режиму роботи насосів або комбінації обох методів. Для зміни гідравлічного опору використовують зсувки (засувки) з ручним, електромеханічним, пневматичним або гідравлічним виконавчим механізмом. Цей метод вводить додатковий послідовний опір, на якому розсіюється зайва енергія, що суттєво знижує ККД системи і збільшує капіталовкладення [2].

Альтернативним підходом є організація дроселювання, яка в електричних колах нагадує підключення паралельних опорів. Замість розсіювання зайвої кінетичної енергії руху води, її можна використовувати для приводу

гідротурбін електрогенераторів, що підвищує енергоефективність установок. Зміна кількості працюючих насосів у системі водопостачання на основі інформації з відповідних датчиків дозволяє регулювати витрати та напір відповідно до потреб. Це також відкриває можливості для впровадження енергозберігаючих алгоритмів. У цьому випадку зайва кінетична енергія води не розсіюється, а зменшується відповідно до кількості працюючих насосів. Точність керування параметрами визначається дискретністю потужності, яка виводиться з мережі. Послідовне з'єднання насосів використовується для підвищення напору, тоді як паралельне – для підвищення продуктивності. У системах водопостачання часто застосовують одночасно як некеровані, так і керовані за швидкістю насоси, що дозволяє оптимізувати їх роботу та підвищити загальну ефективність системи [4].

Зміна швидкості обертання насосу вважається одним з найефективніших способів регулювання його роботи. Якщо гідравлічний опір системи залишається незмінним, то регулювання зазвичай відбувається при стабільному значенні ККД насосу. Дослідження показують, що зниження швидкості всього на 10% може призвести до значної економії енергії, що складає близько 27%. Сьогодні електроприводи, які використовують перетворювачі частоти для асинхронних і синхронних двигунів, набирають популярності. Сучасні перетворювачі не тільки регулюють напругу живлення, але й забезпечують замкнене управління технологічними параметрами насосу. Це дозволяє формувати механічні характеристики, які сприяють плавному запуску насосів. У процесі аналізу досягнень в автоматизації водопостачальних систем важливо відзначити, що можливості оптимізації залежать від типу системи. У великих системах, які забезпечують водопостачання міст, ключовими завданнями є розробка нових підходів для розподілених мереж, прогнозування короткострокового споживання води, моделювання динамічних режимів для аналізу та управління, а також

ієрархічна оптимізація для зниження витрат і ефективного планування режимів роботи [3].

Математична модель водопостачальної системи є складною та нелінійною, з багатьма взаємозв'язками та розподіленими параметрами. Крім того, система підлягає просторовим обмеженням через обмежену ємність резервуарів, а змінні в системі можуть бути як неперервними, так і дискретними. Особливою темою в енергоефективному управлінні насосами є оптимізація їх роботи. Запропоновані методи дозволяють одночасно поліпшувати кілька параметрів системи управління, наприклад, зменшувати електричні втрати, підтримуючи при цьому заданий тиск на виході насосної установки, що в свою чергу підвищує загальну енергоефективність [1].

#### *Опис технологічного процесу*

Насосні установки знаходять широке застосування в різних сферах, включаючи промисловість, енергетику, сільське та комунальне господарства. Найбільш популярними серед них є насоси відцентрового типу. Відцентрові насоси виконують функцію транспортування рідини, перетворюючи кінетичну енергію обертання на гідродинамічну енергію потоку. У цих насосах рух рідини забезпечується відцентровими силами, які виникають внаслідок обертання рідини з певною швидкістю всередині агрегату. Технологічна схема одноагрегатної насосної установки ілюструє цей процес, що можна побачити на рис. 1.1. [4]

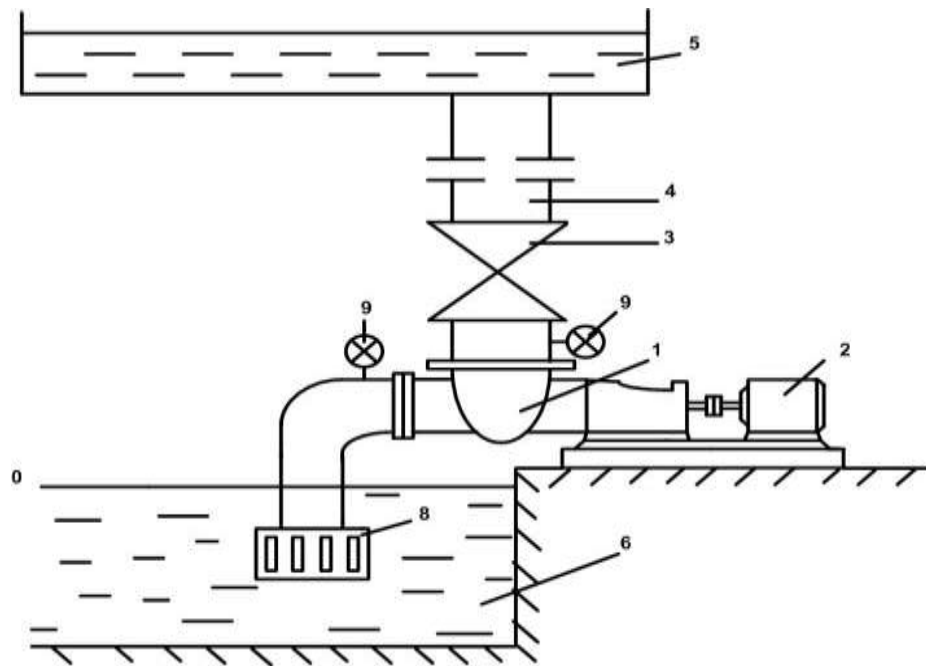


Рисунок 1.1 – Технологічна схема насосної установки

1 – насос; 2 – електродвигун; 3 – засувка; 4 – напірний трубопровід;  
 5 – верхній резервуар; 6 – нижній резервуар; 7 – всмоктуючий  
 трубопровід; 8 – приймальний клапан; 9 – манометри.

Робота насосу визначається його продуктивністю, або подачею, позначеною як  $Q$ . Цей показник відображає обсяг рідини, що перекачується насосом за одиницю часу. Щодо напору насоса, позначеного як  $H$ , то він представляє собою приріст питомої енергії рідини, що проходить через робочі колеса насоса, і фактично є величиною, пропорційною різниці тисків на вході та виході. Напір насоса використовується для подолання сил протитиску в напірному резервуарі, а також для подолання геометричної висоти підйому, позначеної як  $H_g$ , і опору трубопроводів [2]. Статичні характеристики відцентрових насосів можна апроксимувати за допомогою параболічних залежностей, які відомі як  $Q$ - $H$  характеристики, як показано на рис. 1.2, а.

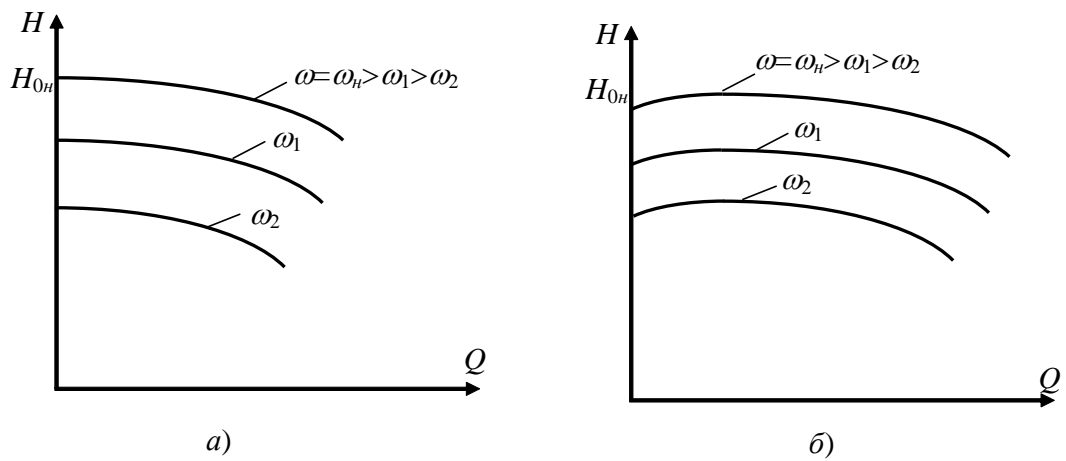


Рисунок 1.2. – Статичні характеристики відцентрових насосів

При відхиленні кута входження потоку в насос від оптимального значення, що регулюється спрямовуючим апаратом, на характеристиках насосу виникає точка екстремуму. Це відображає зміну продуктивності та напору насосу, що може негативно вплинути на його ефективність [5]. На рис. 1.1, б показано, як зміна кута входження потоку впливає на робочі характеристики насосу, що вказує на важливість правильного налаштування спрямовуючого апарату для досягнення оптимальної роботи насосу. Відповідно до рис. 1.2, а

$$H = H_{0H} \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 - a_H Q^2, \quad (1.1)$$

де  $\omega$  – швидкість обертання насосу;  $\omega_H$  – номінальне значення швидкості;  $H_{0H}$  – напір при нульовій подачі та номінальній швидкості;  $a_H$  – гідравлічний опір насосу.

Статичні характеристики гідравлічної мережі (рис. 1.2) також апроксимуються параболою

$$H = H_{ст} + aQ^2, \quad (1.2)$$

де  $H_{ст}$  – напір при нульовій подачі насосу (фактично  $H_T$ );  $a$  – гідравлічний опір мережі.

Величина гідравлічного опору насосу визначається на основі номінальних даних

$$a_n = \frac{H_{0n} - H_n}{Q_n^2}. \quad (1.3)$$

Розрахункове значення гідравлічного опору мережі визначається наступним чином

$$a = \frac{H_p - H_{ст}}{Q_p^2}, \quad (1.4)$$

де  $H_p$ ,  $Q_p$  – напір та продуктивність у робочій точці.

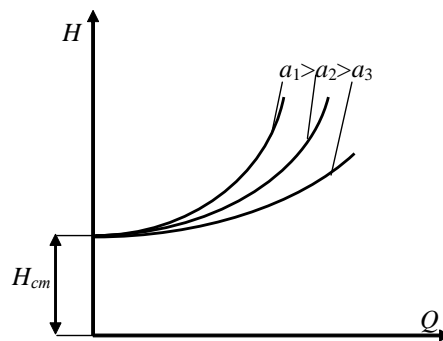


Рисунок 1.3 – Статичні характеристики гідравлічної мережі

Робоча точка насоса А визначається перетином напірної характеристики насоса та характеристики мережі (рис. 1.3).

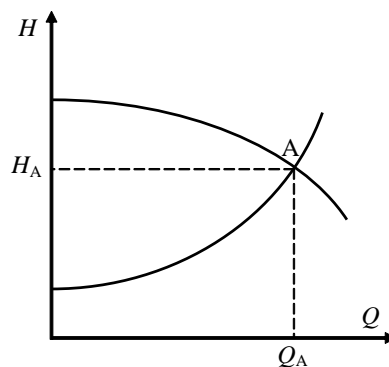


Рисунок 1.4 – Робоча точка насосу у площині статичних характеристик

Зміна робочої точки насоса, що стосується регулювання подачі або напору, може бути досягнута через два основні підходи. Перший з них полягає

у варіюванні гідравлічного опору системи, що здійснюється за допомогою засувки. Цей метод є досить простим і дозволяє контролювати потік рідини, проте може призвести до зниження ефективності насосу через збільшення енергетичних витрат. Другий підхід передбачає регулювання швидкості обертання насосу. Цей варіант забезпечує більш раціональне використання енергії, оскільки дозволяє адаптувати робочі характеристики насосу до конкретних вимог системи. Проте, слід врахувати, що цей метод зазвичай вимагає значних капітальних інвестицій, оскільки може потребувати встановлення спеціального обладнання, такого як частотні перетворювачі [5]. Аналітичне розв'язання рівнянь (1.1) і (1.2) дозволяє визначити продуктивність насосу, що, у свою чергу, сприяє більш точному оцінюванню його роботи в різних умовах експлуатації.

$$Q = \sqrt{\frac{H_{0H} \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 - H_{ст}}{a + a_\phi}}, \quad (1.5)$$

Якщо вважати, що площі перерізу напірного та всмоктуючого трубопроводів є однаковими, і спростити складні перехідні процеси в насосі та трубопроводах, апроксимуючи їх аперіодичною ланкою, можна отримати диференціальне рівняння, що описує поведінку насосу під час регулювання швидкості. Це рівняння відображає динаміку системи, враховуючи вплив зміни швидкості обертання насосу на його продуктивність та напір. Зазвичай, таке диференціальне рівняння має форму, що включає в себе параметри насосу, такі як його продуктивність, напір, а також час, необхідний для досягнення нових робочих умов. В результаті, воно дозволяє аналізувати, як зміна швидкості вплине на робочі характеристики насосу в контексті системи в цілому [7].

$$\chi \frac{dQ}{dt} = \frac{H_{0H}}{\omega_H^2} \omega^2 - H_{ст} - (a_n + a) Q^2, \quad (1.6)$$

де  $\chi$  – стала інтегрування насосу;  $H_{ст}$  – геодезична висота підйому води.

Момент на валу насоса визначається наступним чином

$$M_{ст} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{нас} \omega}, \quad (1.7)$$

де  $\rho$  – густина води;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\eta_{нас}$  – ККД насосу.

Вибір насосу здійснюється на основі вимог щодо його продуктивності та напору, використовуючи каталожні напірні характеристики, на яких зображено залежності  $H=f(Q)$  при різних значеннях швидкості обертання та лінії сталого значення ККД (рис. 1.4).

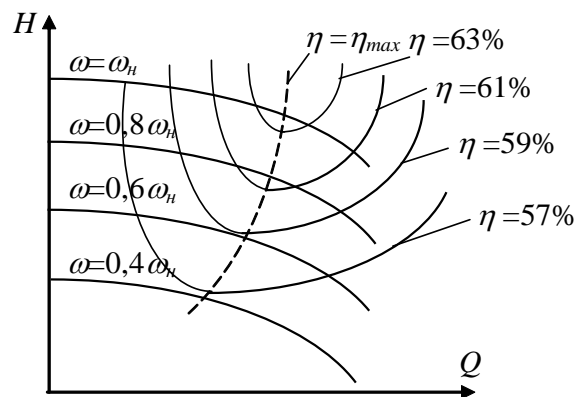


Рисунок 1.4 – Каталожні характеристики насосу

З метою вибору оптимального типу насоса, необхідно врахувати задані параметри, такі як продуктивність ( $Q$ ) та напір ( $H$ ). Важливо, щоб робоча точка насоса розташовувалася якомога ближче до лінії, що відповідає максимальному коефіцієнту корисної дії (ККД), а також до характеристик  $Q$ - $H$  при номінальних обертах. Невідповідність у виборі насоса може призвести до значних енергетичних втрат. Для насосів допускається відхилення ККД в межах  $\pm 7\%$  від максимально можливого значення. Якщо насос не буде відповідати цим критеріям, для досягнення необхідної точності технологічних параметрів може знадобитися коригування, наприклад, підточування діаметрів коліс насоса або введення передаточних механізмів для узгодження

швидкостей насосу та двигуна. Однак ці рішення можуть також негативно вплинути на ККД системи [8].

Оскільки насоси зазвичай функціонують у безперервному режимі, потужність привідного двигуна розраховується для режиму S1. Цей розрахунок враховує всі необхідні параметри, включаючи продуктивність, напір та ефективність насосу, що дозволяє визначити оптимальні умови для його роботи.

$$P = k \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{нас}}}, \quad (1.8)$$

де  $k$  – коефіцієнт запасу ( $1,2 \div 1,4$ ), а  $Q$ ,  $H$ ,  $\eta_{\text{нас}}$  – значення відповідних параметрів в робочій точці.

Значення  $Q$  і  $H$  при номінальних обертах насосу і  $\eta_{\text{нас}} = \eta_{\text{max}}$  прийнято називати номінальними  $Q_n$  і  $H_n$ . Тип двигуна бажано обирати таким, щоб номінальні швидкості насосу і двигуна збігалися.

#### *Вимоги до систем автоматичного керування насосної установки*

Автоматизація насосних установок є ключовим етапом у вдосконаленні технологічних процесів, оскільки вона дозволяє значно підвищити їхню ефективність і надійність. Завдяки повній автоматизації зменшується потреба в постійній участі людини, яка виконує лише функції спостерігача та коригувальника, що, у свою чергу, знижує ризики помилок та підвищує точність управлінських рішень. Впровадження мікропроцесорних систем, таких як програмовані контролери, замість традиційної жорсткої логіки управління, забезпечує більшу гнучкість і надійність у роботі системи. Важливою вимогою для автоматичного керування насосами є плавний старт агрегату, що дозволяє уникнути механічних навантажень і зменшує пускові струми, які можуть призвести до зношування обладнання. Система повинна також підтримувати максимально можливий коефіцієнт корисної дії, регулюючи роботу насоса відповідно до змін у параметрах гідромережі. Це дозволяє забезпечити стабільність в роботі та оптимізувати енергетичні

витрати. Крім того, автоматизація передбачає регулювання швидкості обертання електродвигуна для підтримки необхідного рівня напору або витрат рідини в системі. Після відновлення електропостачання насос повинен мати можливість автоматично включитися та розганятися до заданих параметрів. Не менш важливим є захист від теплових перевантажень, що дозволяє запобігти перегріву приводних двигунів. Система також повинна забезпечувати стабільну роботу без виникнення гідравлічних ударів, які можуть негативно вплинути на обладнання. Для досягнення максимальної ефективності регулювання швидкості насосу має бути в межах трьох разів від мінімального до максимального значення, що дозволяє адаптувати його роботу до різних умов експлуатації. Таким чином, автоматизація насосних установок сприяє їх оптимізації, підвищуючи загальну ефективність і надійність у процесі експлуатації [9].

#### **Висновки до розділу.**

Проведено аналітичний огляд методів управління технологічними параметрами насосних установок, в якому акцентовано увагу на найбільш ефективних та енергоощадних підходах. У рамках дослідження представлено детальний опис технологічного процесу перекачування рідини за допомогою насосів для водопостачання, а також наведено статичні характеристики насосів і їх математичні моделі. Окрім цього, сформульовано вимоги до автоматизованого електроприводу насосних установок. Ці вимоги стали основою для розробки електромеханічної системи автоматичного управління насосною установкою. Таким чином, проведений огляд не лише висвітлює існуючі технологічні рішення, а й закладає фундамент для подальшого вдосконалення систем управління насосами, що сприятиме підвищенню їхньої ефективності та надійності.

## 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ НАСОСУ ТА ВИБІР ПРИВОДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

*Розрахунок потужності насосу для приводного двигуна одинарної насосної установки*

Розрахунок потужності насосу для приводного двигуна одинарної насосної установки здійснюється за формулою:

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\max}} \quad (2.1)$$

де  $\rho$  – густина рідини, яка перекачується, в даному випадку це – вода;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$Q$  – продуктивність насоса;

$H$  – напір;

$\eta_{\max}$  – максимальне значення ККД.

За формулою (2.1) отримаємо:

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\max}} = \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 124 \cdot 240}{3600 \cdot 0.629} = 128 \text{ кВт.} \quad (2.2)$$

Згідно отриманому значенню вибираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А315S2У3, який має наступні паспортні дані приведені в таблиці 2.1 [9]:

Паспортні дані двигуна 4А315S2У3 [9]

Номінальна потужність	$P_{2n} = 160 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 1$
Момент інерції	$J_d = 1.4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 92\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.9$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 1.9$
Номінальне ковзання	$S_n = 1.9\%$
Критичне ковзання	$S_k = 8.5\%$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
<i>Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)</i>	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{X}_1^I = 0.093$
Активний опір статора	$\bar{R}_1^I = 0.015$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{X}_2^{II} = 0.12$
Приведений індуктивний опір ротора	$\bar{R}_2^{II} = 0.012$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{X}_\mu = 5$

### *Побудова статичних характеристик насосів*

Для створення статичних характеристик насосів у MATLAB на основі інформації з програми Vogel Select, необхідно виконати кілька важливих кроків. Спочатку слід зібрати дані про напори та витрати конкретного насосу. Цю інформацію зазвичай можна знайти у графічному форматі, тому вам, можливо, доведеться вручну зчитувати значення або використовувати функцію експорту, якщо вона доступна в програмі.

Після того як дані будуть зібрані, відкрийте MATLAB і створіть новий скрипт. У цьому файлі потрібно визначити вектори для значень напору та витрати, які ви отримали з Vogel Select. Можна створити окремі вектори для кожного насосу, записуючи відповідні значення у змінні.

Коли ви підготуєте дані, можна переходити до обчислення загальних характеристик насосів. У випадку, якщо насоси з'єднані послідовно, загальний напір буде сумою напорів обох насосів для кожного значення витрати, при цьому витрата залишиться незмінною. Ці обчислення можна легко реалізувати у MATLAB, що дозволить вам отримати нові вектори з результатами.

Наступним етапом буде побудова графіка, на якому будуть відображені статичні характеристики насосів. Використовуючи функції для візуалізації, ви зможете створити графік, де по осі X буде витрата, а по осі Y – напір. Важливо додати підписи до осей та заголовки, щоб графік був зрозумілим для користувачів.

На завершення, якщо ви плануєте використовувати графік у майбутньому, рекомендується зберегти його у потрібному форматі. Це забезпечить вам доступ до візуалізації характеристик насосів, створеної в MATLAB, що буде корисно для подальшого аналізу та порівняння з даними з Vogel Select.:

$$H_1 = \frac{H_{01H}}{\omega_{H1}^2} \omega_1^2 - a_{H1} Q^2; \quad (2.3)$$

$$H_2 = \frac{H_{02n}}{\omega_{n2}^2} \omega_2^2 - a_{n2} Q^2; \quad (2.4)$$

$$H = H_1 + H_2; \quad (2.5)$$

де  $H_1, H_2$  – напори, що створюються насосами;  $H_{01n}$  та  $H_{02n}$  – номінальні напори при нульових подачах насосів при номінальних швидкостях;  $\omega_1, \omega_2$  – кутові швидкості обертання насосів;  $\omega_{n1}, \omega_{n2}$  – номінальні кутові швидкості обертання насосів;  $H$  – загальний напір насосів.

Вибираємо насос фірми Vogel Pumpen типу CNX-100-65-400. Також переведемо статичні характеристики ККД –  $Q$ , що зображені на рис. 2.2

. Для розрахунку потужності вибираємо значення  $Q$  та  $H$  при максимальній швидкості ( $n = 2900$  об/хв) та ККД ( $\eta_{\max} = 62,9\%$ ).

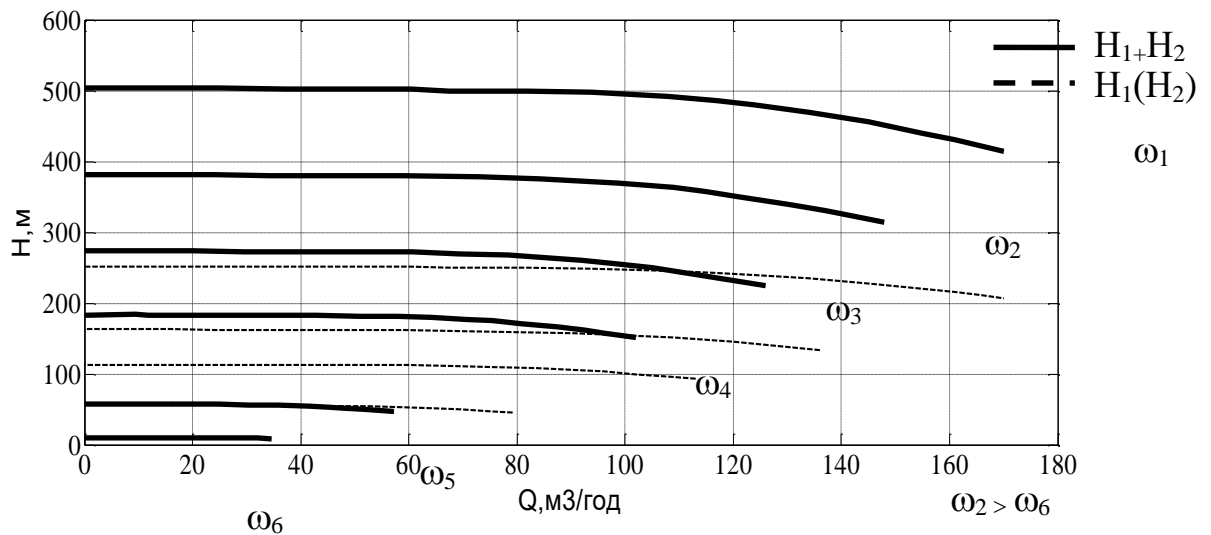


Рисунок 2.1 – Статичні характеристики насосів

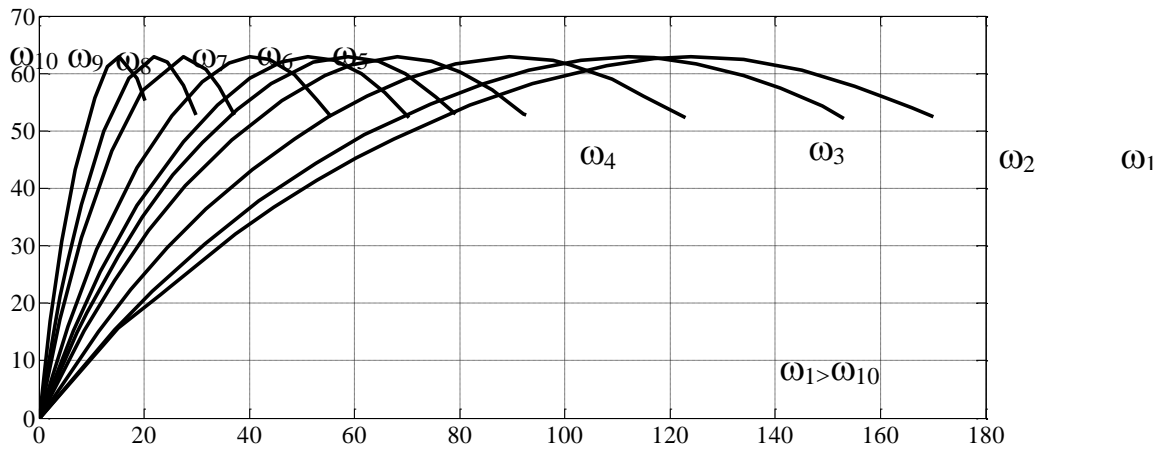


Рисунок 2.2 – Характеристики Q – ККД

*Розрахунок номінальних даних двигуна*

Розрахуємо параметри номінального режиму двигуна.

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.2 \text{ рад/с} \quad (2.6)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314.159}{1} = 314.2 \text{ рад/с} . \quad (2.7)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - S_n) = 314.159 \cdot (1 - 0.019) = 308.1 \text{ рад/с} \quad (2.8)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = 160 \cdot 10^3 / 308.19 = 519.1 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.9)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності  $\lambda$  з каталогу):

$$M_k = M_n \cdot \lambda = 519.16 \cdot 1.9 = 986.4 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.10)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 219.3 \text{ В}, \quad (2.11)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{160 \cdot 10^3}{3 \cdot 219.393 \cdot 0.92 \cdot 0.9} = 293.5 \text{ А}. \quad (2.12)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 310.2 \text{ В}, \quad (2.13)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 293.593 = 415.2 \text{ А}. \quad (2.14)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при  $R_1 = 0$ :

$$\Psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{310.269}{314.159} = 0.9 \text{ Вб}. \quad (2.15)$$

*Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення*

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 2.1.

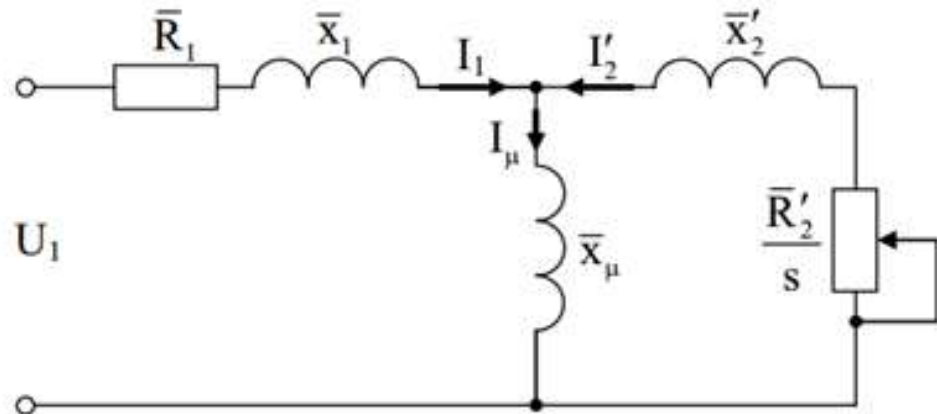


Рисунок 2.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Наведені в таблиці 1 параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис. 2.2.

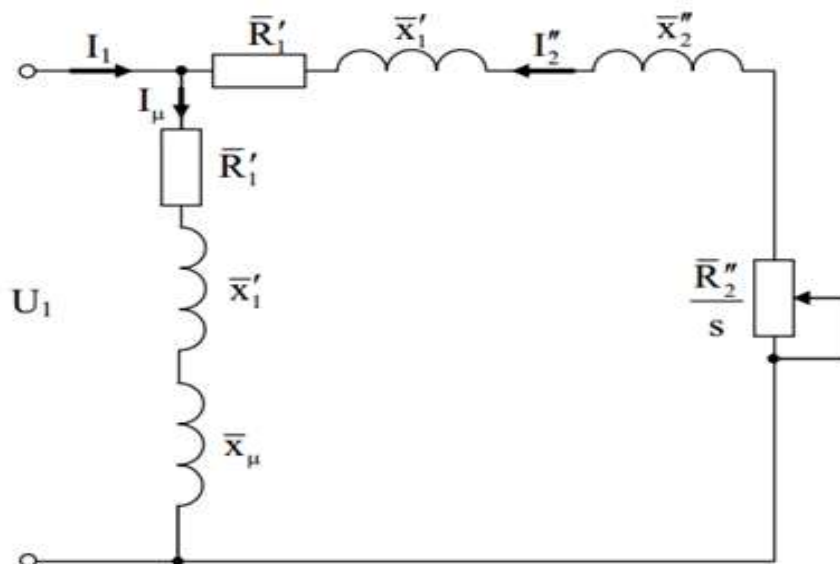


Рисунок 2.2 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується наступна методика:

Коефіцієнти перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{(\bar{x}_\mu)^2 + 4 \cdot \bar{x}_1' \cdot \bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{5 + \sqrt{5^2 + 4 \cdot 0.093 \cdot 5}}{2 \cdot 5} = 1.0 \quad (2.16)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в відносних одиницях:

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= \frac{\bar{X}_1'}{c_1} = \frac{0.093}{1.018} = 0.091 \\ \bar{R}_1 &= \frac{\bar{R}_1'}{c_1} = \frac{0.015}{1.018} = 0.0147 \\ \bar{X}_2 &= \frac{\bar{X}_2''}{c_1^2} = \frac{0.12}{1.018^2} = 0.116, \\ \bar{R}_2 &= \frac{\bar{R}_2''}{c_1^2} = \frac{0.012}{1.018^2} = 0.0116. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

$$\begin{aligned}
X_1 &= \bar{X}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.091 \cdot \frac{219.393}{293.593} = 0.068 \text{ Ом}, \\
R_1 &= \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0197 \cdot \frac{219.393}{293.593} = 0.011 \text{ Ом}, \\
X_2^l &= \bar{X}_2^l \frac{U_n}{I_n} = 0.1262 \cdot \frac{219.393}{293.593} = 0.086 \text{ Ом}, \\
R_2 &= \bar{R}_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.0155 \cdot \frac{219.393}{293.593} = 8.648 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \\
X_\mu &= \bar{X}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 5 \cdot \frac{219.393}{293.593} = 3.736 \text{ Ом}.
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{0.068}{314.159} = 2.172 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, \tag{2.19}$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2^l}{\omega_0} = \frac{0.086}{314.159} = 2.753 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}.$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0} = \frac{3.736}{314.159} = 0.012 \text{ Гн}. \tag{2.20}$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.012 + 2.172 \cdot 10^{-4} = 0.01211 \text{ Гн}, \tag{2.21}$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.012 + 2.753 \cdot 10^{-4} = 0.012168 \text{ Гн}.$$

### **Висновки до розділу.**

У цьому розділі було проведено детальний розрахунок потужності насосу для приводного двигуна одинарної насосної установки, а також вибір відповідного асинхронного двигуна. Для цього був обраний насос типу CNX-100-65-400 за допомогою програми Vogel Select.

Після визначення необхідної потужності насосу, відповідно до отриманого значення, було обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А315S2У3. Цей двигун відповідає вимогам, що впливають з розрахунків, забезпечуючи ефективну роботу насосної установки.

Додатково для обраного насосу були побудовані статичні характеристики, які є важливими для аналізу роботи системи. Ці характеристики дозволяють відстежувати рух робочої точки насосу при зміні будь-яких технологічних параметрів, а також при зміні частоти обертання відповідного асинхронного двигуна. Це забезпечує можливість оптимізації роботи насосної установки в залежності від умов експлуатації та технологічних вимог.

### 3 ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ЙОГО ОПИС

#### Вибір перетворювача частоти

Вибір перетворювача частоти здійснюється за електричною потужністю вибраного асинхронного двигуна, яка визначається за формулою:

$$P_{el} = \frac{P_{мех}}{\eta_{об}} = \frac{160 \cdot 10^3}{0.92} = 173.9 \text{ кВт.} \quad (3.1)$$

Відповідно до розрахованого значення електричної потужності, обираємо перетворювач частоти типу АВВ ACS550-02-368А-4 з номінальною потужністю 200 кВт, який має паспортні дані, наведені у таблиці 3.1 [7].

Таблиця 3.1

Паспортні дані перетворювача частоти

Номінальна потужність	$P_{2H} = 200 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1\text{ЛН}} = 368 \text{ В}$
Кількість фаз / напруга на вході	3-ф/380 В
Кількість фаз / напруга на виході	3-ф/380 В
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.94$
Коефіцієнт потужності	$\cos(\varphi) = 0.92$

### *Вибір датчика напору та вибір датчика продуктивності*

Датчик напору обирається на основі максимального значення напору насоса, яке становить 250 метрів, або 25 бар. У зв'язку з цим, було вирішено використовувати датчик типу SEN-3276 3, що має межу вимірювання тиску, що дорівнює 25 бар. Цей датчик має важливі характеристики, які забезпечують його ефективність. Він здатний вимірювати тиск у діапазоні від 0 до 25 бар, що робить його придатним для даної насосної системи. Вихідні сигнали можуть бути аналоговими, що дозволяє зручно інтегрувати його в існуючі системи управління. Датчик має високу точність, що становить  $\pm 1\%$  від повного діапазону, що є критично важливим для точних вимірювань. Температурний діапазон роботи датчика варіюється від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , що робить його універсальним/ Датчик також має захист IP65, що гарантує його надійність в умовах впливу пилу та вологи. Живлення пристрою здійснюється в діапазоні від 12 до 30 В постійного струму. Вибір даного датчика є обґрунтованим, оскільки він забезпечує необхідну точність і надійність для ефективного функціонування насосної установки. Це, в свою чергу, сприяє оптимізації роботи системи в цілому. який має наступні паспортні дані [11]:

Таблиця 3.2

#### Паспортні дані датчика напору

Версія	З внутрішньою мембраною
Тип тиску	Відносний
Клас точності	$\pm 0.5\%$
Температурний діапазон	$-30..+100^{\circ}\text{C}$
Матеріал корпусу	Нержавіюча сталь
Вихідний сигнал	4 – 20мА

Датчик витрати, або витратомір, обирається на основі максимального значення продуктивності насоса, що становить 160 м<sup>3</sup>/год. У зв'язку з цим,

було вирішено використовувати витратомір типу DPL, який має діапазон вимірювання від 0,0015 до 1,5 м<sup>3</sup>/год. Цей пристрій характеризується високою точністю та чутливістю, що дозволяє ефективно контролювати витрату рідини. Його можливості забезпечують надійні дані про продуктивність насоса, що є критично важливим для оптимізації роботи системи. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню загальної ефективності насосної системи. Отже, датчик вибираємо типу DPL 0,0015..1,5 м<sup>3</sup>/год, який має наступні паспортні дані [10]:

Таблиця 3.3

Паспортні дані датчика продуктивності

Загальний діапазон вимірювань	0,1..150 м <sup>3</sup> /год
Ступінь захисту	IP 65
Клас точності	± 2.5%
Максимальна температура	-70 °C
Матеріал корпусу	Поліпропілен
Вихідний сигнал	4 – 20мА

### Висновки до розділу.

У цьому розділі дипломної роботи проведено аналіз та вибір технологічного обладнання, а також його детальний опис.

Рішення щодо перетворювача частоти базувалося на електричній потужності асинхронного двигуна. В результаті розрахунків було обрано модель перетворювача частоти АВВ ACS550-02-368А-4, яка має номінальну потужність 200 кВт. Додатково, з урахуванням статичних характеристик насосу, було визначено необхідні датчики. Для вимірювання напору обрано датчик типу SEN-3276 3, що відповідає максимальному значенню напору. Щодо контролю витрати рідини, вибір припав на витратомір типу DPL, що відповідає максимальній продуктивності насоса.

## 4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИМИ НАСОСАМИ

*Математична модель системи керування для послідовно з'єднаних насосів*

Математична модель двох послідовно з'єднаних насосів будується на основі еквівалентної схеми заміщення, що зображена на рис. 4.1 [11].

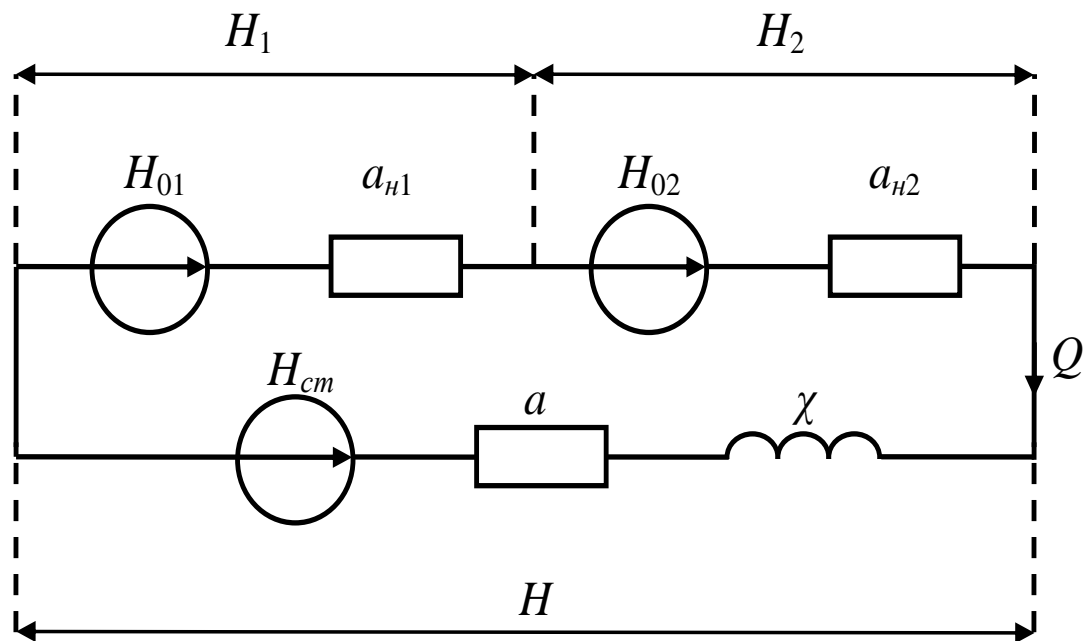


Рисунок 4.1 – Еквівалентна схема заміщення двох послідовно працюючих насосів

На рис. 4.1 введені наступні позначення:

$H_{01}$ ,  $H_{02}$  – напори при нульових подачах першого та другого насосів;

$a_{n1}$ ,  $a_{n2}$  – номінальні гідравлічні опори першого та другого насосів відповідно;

$Q$  – продуктивність насосів;

$H_1$ ,  $H_2$  – напори першого та другого насосів відповідно.

На основі схеми заміщення, поданої на рисунку 4.1, отримаємо математичну модель двох послідовно з'єднаних насосів разом з гідравлічною мережею, що має наступний вигляд [14]:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H_{01н}}{\chi \omega_{н1}^2} \omega_1^2 + \frac{H_{02н}}{\chi \omega_{н1}^2} \omega_2^2 - \frac{H_{cm}}{\chi} - \frac{1}{\chi} (a_{н1} + a_{н2} + a) Q^2 \quad (4.1)$$

$$H_1 = \frac{H_{01н}}{\omega_{н1}^2} \omega_1^2 - a_{н1} Q^2 \quad (4.2)$$

$$H_2 = \frac{H_{02н}}{\omega_{н2}^2} \omega_2^2 - a_{н2} Q^2 \quad (4.3)$$

$$M_{c1} = \frac{\rho g Q H_1}{\eta_{нас1} \omega_1} \quad (4.4)$$

$$M_{c2} = \frac{\rho g Q H_2}{\eta_{нас2} \omega_2} \quad (4.5)$$

$$H = H_1 + H_2, \quad (4.6)$$

де  $Q$  – продуктивність насосів;  $H_{01н}$  та  $H_{02н}$  – номінальні напори при нульових подачах першого та другого насосів при номінальних швидкостях відповідно;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – кутові швидкості обертання першого та другого насосів відповідно;  $\omega_{н1}$ ,  $\omega_{н2}$  – номінальні кутові швидкості обертання першого та другого насосів відповідно;  $\chi$  – стала інтегрування;  $M_{c1}$ ,  $M_{c2}$  – моменти навантаження на валах двигунів першого та другого насосів відповідно;  $\eta_{нас1}$ ,  $\eta_{нас2}$  – ККД першого та другого насосів відповідно;  $H$  – сумарний напір першого та другого насосів.

Структурна схема двох послідовно з'єднаних насосів, побудована на основі рівнянь (4.1) – (4.6), зображена на рис. 4.2.

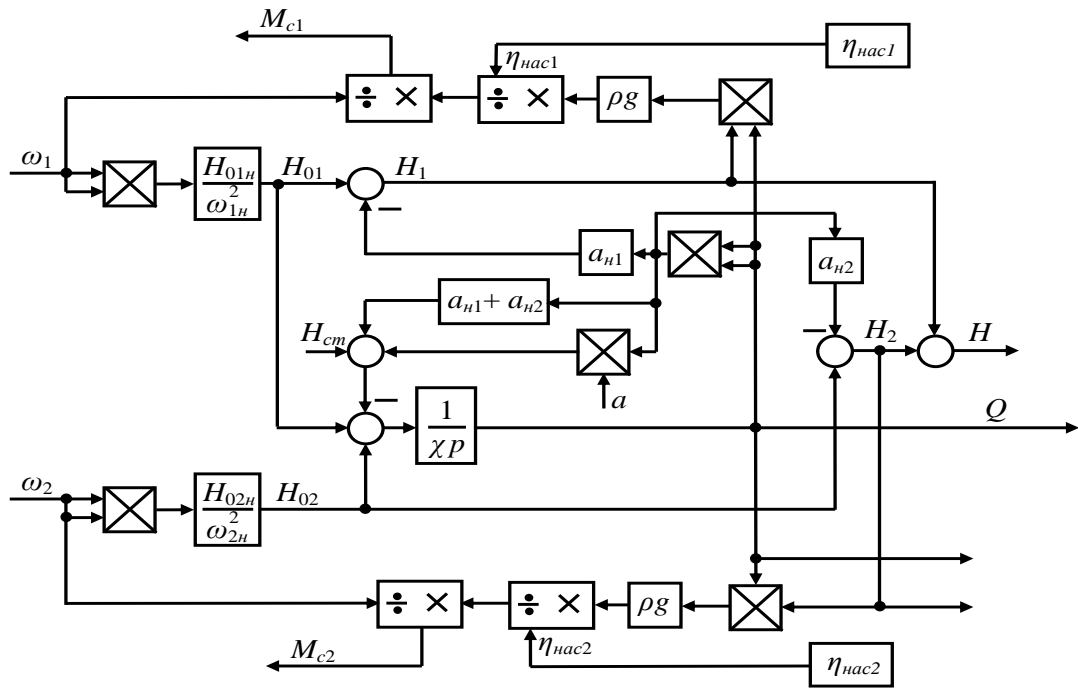


Рисунок 4.2 – Структурна схема двох послідовно працюючих насосів

### Математична модель асинхронного двигуна

Математична модель асинхронного двигуна виводиться наступним чином:

Нехай задані вектори:

$$\vec{i}_1 = (i_{1a}, i_{1b})^T \quad (4.7)$$

$$\vec{\psi}_2 = (\psi_{2a}, \psi_{2b})^T \quad (4.8)$$

де  $\vec{i}_1$  – вектор струму статора;

$\vec{\psi}_2$  – вектор потокозчеплення ротора;

$i_{1a}, i_{1b}$  – проекції вектора струму статора на вісі системи координат (a-b);

$\psi_{2a}, \psi_{2b}$  – проекції вектора потокозчеплення ротора на вісі системи координат (a-b).

Запишемо рівняння електричної рівноваги:

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + \omega_k J \psi_1 \quad (4.9)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + (\omega_k - \omega) J \psi_2 \quad (4.10)$$

де  $u_1$  та  $u_2$  – напруга статора та ротора відповідно;

$R_1, R_2$  – активні опори обмоток статора та ротора відповідно;

$\omega$  – кутова швидкість двигуна;

$\psi_1$  – потокозчеплення статора;

$i_2$  – струм ротора.

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Рівняння для потокозчеплення статора і ротора:

$$\psi_1 = L_1 i_1 + L_m i_2 \quad (4.11)$$

$$\psi_2 = L_m i_1 + L_2 i_2, \quad (4.12)$$

де  $L_1$  та  $L_2$  – індуктивності обмоток статора і ротора відповідно

$L_m$  – взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора

Виразимо із рівнянь (4.11)-(4.12) струм  $i_2$ :

$$\vec{i}_2 = L_2^{-1} (\psi_2 - L_m \vec{i}_1) \quad (4.13)$$

Підставимо рівняння (4.13) у рівняння (4.10) і отримаємо:

$$\dot{\psi}_2 = -\alpha \psi_2 + \omega J \psi_2 + \alpha L_m \vec{i}_1 \quad (4.14)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_2}{L_2} = T_R^{-1},$$

$T_R^{-1}$  – стала часу роторного кола.

Після підстановки виразу для  $\psi_1$  з (4.12) у рівняння (4.10), а також після перетворень з урахуванням (4.13), отримаємо рівняння динаміки струму статора:

$$\dot{i}_1 = -\frac{R_1}{\sigma} i_1 - \beta \dot{\psi}_2 + \frac{1}{\sigma} u_1 \quad (4.15)$$

$$\text{де } \sigma = L_1 \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right),$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} - \text{введені змінні для спрощення вигляду}$$

З урахуванням (4.13) рівняння моменту асинхронного двигуна набуває вигляду:

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} i_1^T J \Psi_2 \quad (4.16)$$

При розгляді узагальненої електричної машини приймається, що кількість пар полюсів дорівнює одиниці ( $p_n = 1$ ). Якщо машина має кількість пар полюсів  $p_n \neq 1$  тоді складова  $\omega J \Psi_2$  в (4.14) масштабуються множителем  $p_n$  [12].

Поєднуючи (4.14), (4.15), (4.16) з рівняннями руху механічної частини з моментом інерції  $J$ , математична модель АД запишеться у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \omega &= \frac{1}{J} (M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}) \\ \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a} \\ \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b} \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha \psi_{2b} - p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\text{де } \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta, \beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma}.$$

Отримана динамічна модель асинхронного двигуна у координатах статора (а-б). За системою (4.17), будемо структурну схему зображену на рис. 4.3.

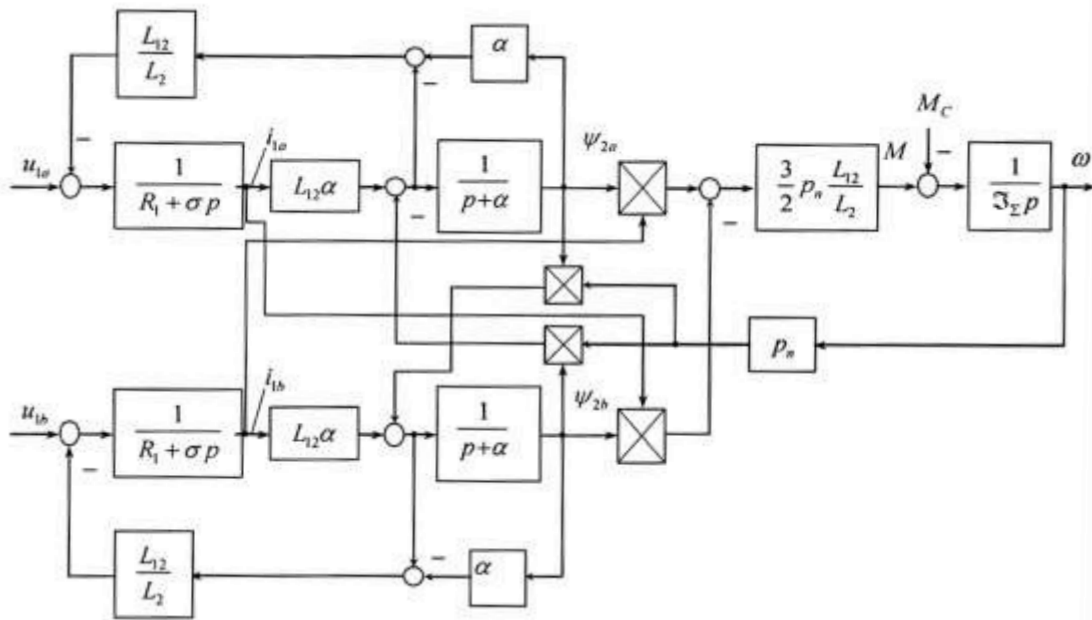


Рисунок 4.3 – Структурна схема динамічної моделі асинхронного двигуна

### Математична модель регулятора ККД насосу

Одним із шляхів підвищення енергоефективності насосного комплексу є оптимізація коефіцієнта корисної дії (ККД) насосу. Розглянемо, як працює енергоефективний регулятор, призначений для одиночного агрегату. Цей регулятор є контролером, який не вимагає модернізації існуючих систем водопостачання, а лише передбачає наявність частотно-керованого асинхронного електроприводу та інформації про каталожні характеристики використовуваного насосу.

Принцип роботи регулятора ґрунтується на методі послідовних кроків, що дозволяє знаходити екстремуми. Під час експлуатації насосної установки, в залежності від споживання води та необхідного тиску, робоча точка може

опинитися або вище, або нижче лінії максимального ККД. Це ілюструється на рисунку, де виділено дві зони: перша зона, де робоча точка розташована над лінією ККД, і друга зона, де вона знаходиться нижче. Контролер, спираючись на дані з датчиків продуктивності та швидкості, визначає, в якій зоні перебуває робоча точка. Якщо вона знаходиться в першій зоні, регулятор надсилає команду на зменшення швидкості. У випадку, якщо робоча точка потрапляє в другу зону і насос працює на характеристиці, що нижча за номінальну, регулятор ініціює збільшення швидкості, що дозволяє оптимізувати роботу насоса [11].

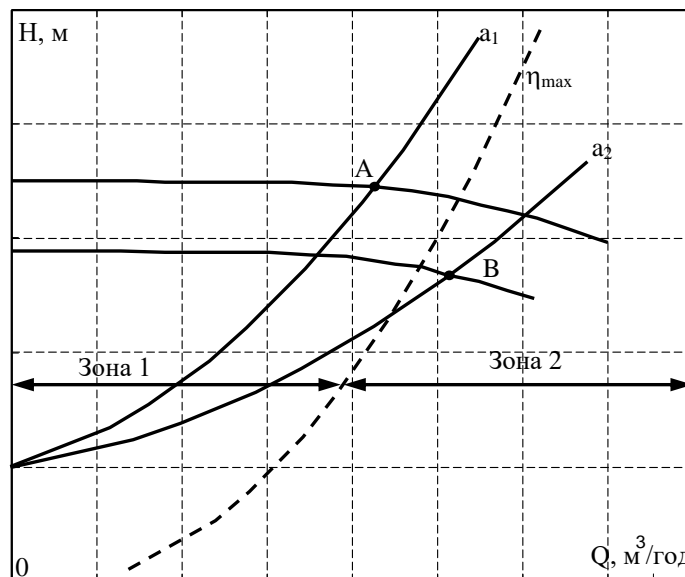


Рисунок 4.4 – Зони роботи екстремального регулятора

Робота екстремального регулятора передбачає також наявність системи стабілізації продуктивності, що полягає в наступному. Спочатку вимірюється фактична продуктивність насоса, після чого за допомогою кривої максимального ККД ( $\eta_{max}$ ) розраховується оптимальна швидкість ( $\omega^*$ ), яка відповідає максимальному значенню ККД. Якщо фактична швидкість насоса перевищує  $\omega^*$ , регулятор поступово зменшує швидкість до тих пір, поки вона не стане меншою за  $\omega^*$ . Після цього швидкість знову збільшується, що може призводити до коливань робочої точки в околі кривої максимального ККД.

У разі, якщо стабілізація не відбувається, енергоефективність системи та алгоритм роботи регулятора залежать від зони, в якій перебуває робоча точка. Якщо робоча точка знаходиться в першій зоні, регулятор зменшує швидкість до мінімально можливого значення. Хоча це не забезпечує максимальний ККД, проте підвищує енергоефективність системи за рахунок зменшення споживаної потужності двигуном при зниженні швидкості. У випадку, якщо робоча точка потрапляє в другу зону, регулятор збільшує швидкість до максимально можливого значення, що відповідає номінальній характеристиці насоса. На основі вищевикладеного, структурна схема екстремального енергоефективного регулятора має вигляд, зображений на рисунку 4.5. Ця схема демонструє взаємозв'язок між компонентами системи, які забезпечують оптимізацію роботи насоса та підвищення його енергоефективності [15].

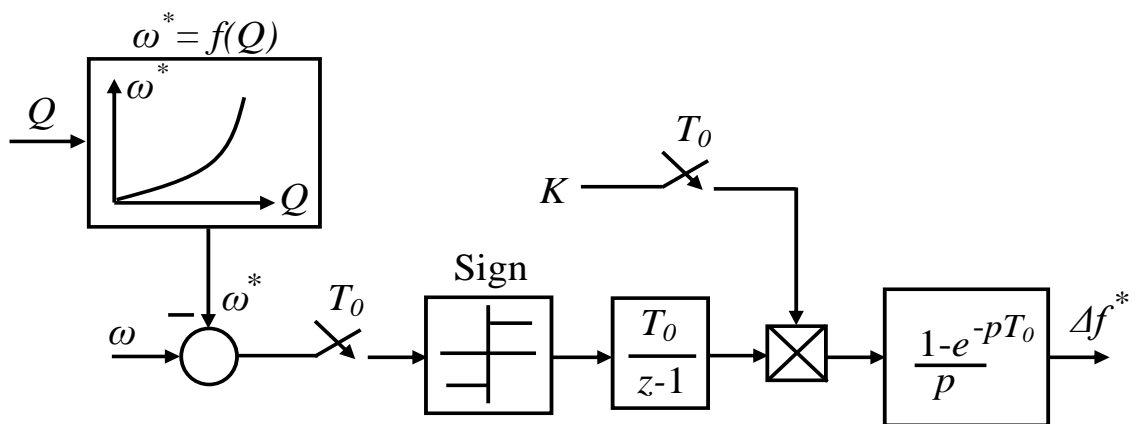


Рисунок 4.5 – Структурна схема енергоефективного регулятора ККД насосу

На структурній схемі введені наступні позначення:  $Q$  – фактична продуктивність насоса;  $\omega^*$  – бажана швидкість обертання двигуна, при якій забезпечується максимальний ККД при бажаному значенні продуктивності;  $\omega$  – фактична виміряна швидкість двигуна;  $T_0$  – період квантування контролера;  $\Delta f^*$  – необхідна величина зменшення завдання частоти;  $K$  – параметр, що

задає амплітуду зміни завдання частоти. Задана швидкість обчислюється за наступним виразом

$$\omega^* = k_1 Q^2 + k_2 Q + k_3, \quad (4.18)$$

де  $k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти апроксимації кривої максимального ККД.

Рівняння для вихідної заданої частоти на основі структурної схеми матиме вигляд

$$\Delta f^* = \frac{KT_0}{z-1} \text{sign}(\omega - \omega^*), \quad (4.19)$$

Після перетворення рівняння для запису у різницях отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta f^* ((n+1)T_0) = \Delta f^* (nT_0) + \\ + KT_0 \text{sign} \left[ \omega(nT_0) - k_1 Q^2(nT_0) - k_2 Q(nT_0) - k_3 \right]. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Алгоритм роботи енергоефективного регулятора наступний. Нехай насос працює на довільній характеристиці зі швидкістю  $\omega_1 = \omega(nT_0)$  в робочій точці А (рис. 4.6) з характеристикою гідравлічної мережі 1, причому робоча точка розташована зліва від лінії максимального ККД [12].

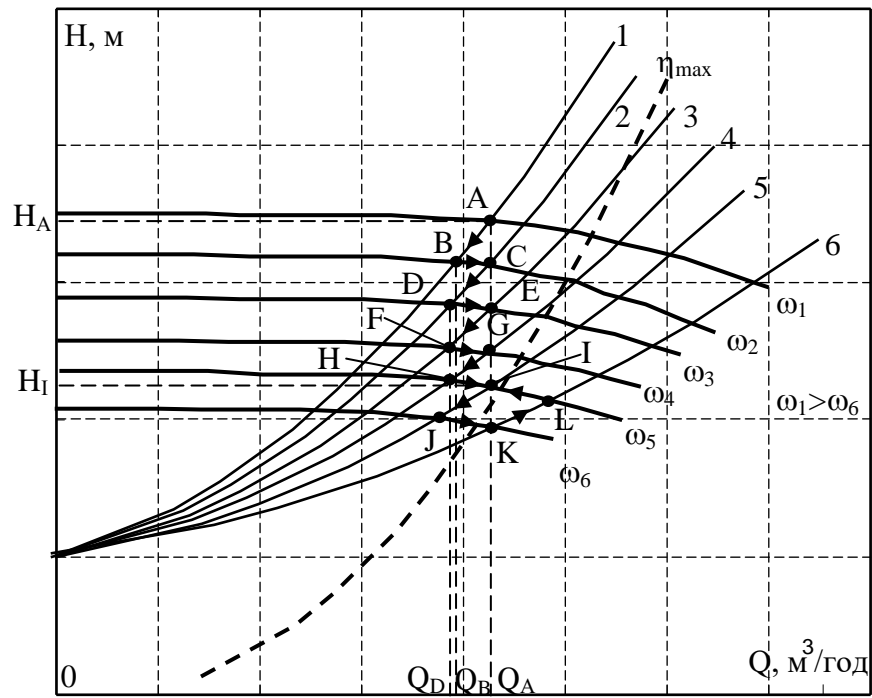


Рисунок 4.6 – Алгоритм роботи енергоефективного регулятора ККД насосу

Для переходу на лінію максимального ККД при умові стабілізації продуктивності необхідно змінити робочу точку на швидкість, яку визначає функція на основі даних з датчика продуктивності. Для цього система керування зменшує швидкість двигуна на деяке фіксоване значення, що задається параметром, і насос переходить на нову характеристику зі швидкістю у робочу точку В, якій відповідає продуктивність  $Q_B$ . Якщо продуктивність стабілізується, то при зменшенні швидкості насосної установки зменшується продуктивність, необхідно зменшити гідравлічний опір мережі до значення, при якому характеристика мережі прийме вигляд 2. Таким чином, робоча точка переходить у точку С, якій відповідає продуктивність  $Q_C$ . На наступному періоді квантування система керування знову зменшить оберти насосу на фіксоване значення (характеристика зі швидкістю, робоча точка D). Такий процес відбуватиметься доти, поки робоча точка насосу не виявиться праворуч кривої максимального ККД (швидкісна характеристика на швидкості, робоча точка К, характеристика мережі б) [7].

Після цього система фіксовано збільшить оберти насосу, що призведе до збільшення продуктивності та необхідності її стабілізувати. В результаті робота насосу характеризуватиметься циклічною послідовністю наступних робочих точок I-J-K-L. Оскільки ККД насоса однозначно визначається швидкістю та продуктивністю, то в результаті роботи алгоритму ККД насоса коливатиметься в околі максимального значення. Якщо стабілізація продуктивності не відбувається (не змінюється величина гідравлічного опору), то вона буде зменшуватися до мінімально-дозволеного значення. У випадку відсутності обмеження витрати можуть зменшитись до нуля. Математичний опис регулятора може бути застосований до різних турбомеханізмів, таких як вентилятори та кондиціонери, а також до механізмів, що функціонують у тривалому режимі. У випадках, коли робота установок обмежена за часом, важливо, щоб такт квантування був значно меншим. Це дозволяє системі швидко адаптуватися до нових умов і досягати заданої робочої точки практично миттєво. У таких ситуаціях дискретний регулятор може бути замінений на аналоговий пропорційно-інтегруючий (ПІ) регулятор. Цей тип регулятора забезпечує виконання умови, за якої різниця між фактичною швидкістю та заданою швидкістю дорівнює нулю. Це дозволяє робочій точці досягати лінії максимального коефіцієнта корисної дії. Математичний вираз для ПІ-регулятора виглядає як функція, що включає як пропорційний, так і інтегральний компоненти. Вихідний сигнал регулятора визначається як комбінація пропорційної частини, що залежить від помилки регулювання, і інтегральної частини, яка враховує накопичену помилку. Це дозволяє не лише коригувати швидкість, але й усувати сталу похибку, що забезпечує більш точне регулювання. Таким чином, цей математичний підхід є універсальним і може бути адаптований під різні типи турбомеханізмів, гарантуючи їх ефективну та стабільну роботу в умовах змінних навантажень і зовнішніх впливів [14].

$$\Delta f = (\omega - \omega^*) (K_p + 1/T_i p), \quad (4.21)$$

де  $\Delta f$  – приріст частоти завдання;  $K_p$  – пропорційна складова регулятора;  $T_i$  – стала часу інтегральної частини регулятора. Задана швидкість обчислюється згідно виразу (4.18).

### *Оцінювач ККД насосу на основі нейронної мережі*

Застосування енергоефективних принципів управління насосними установками вимагає точних вимірювань технологічних координат, які є критично важливими для їх ефективного функціонування. Однак, висока вартість датчиків продуктивності та відсутність датчиків швидкості на приводних двигунах створюють серйозні проблеми. Для подолання цих викликів пропонується використання штучних нейронних мереж (НМ), які здатні до самонавчання. Це дозволяє створювати оцінювачі технологічних координат на основі вже доступних сигналів.

Процес проектування нейронної мережі складається з кількох етапів. Спочатку визначається кількість прихованих шарів та нейронів у кожному з них. Потім обирається функція активації для нейронів, а також проводиться навчання мережі, в результаті якого формуються параметри її внутрішніх зв'язків. Збільшення кількості нейронів і шарів може підвищити точність, але також ускладнює реалізацію через зростання кількості рівнянь для математичного опису. Тому важливо знайти оптимальний баланс між кількістю нейронів і точністю, проводячи тренування для різних конфігурацій.

Методика розробки оцінювача невідомого параметра системи управління включає кілька кроків. Спочатку визначаються доступні сигнали для вимірювання та невідома координата, яка буде вихідним масивом. Потім встановлюється взаємозв'язок між невідомим параметром і доступними сигналами, використовуючи математичні залежності чи експериментальні

характеристики. Після цього формуються вхідний та вихідний масиви нейронної мережі, обирається функція активації нейронів, а також функція тренування мережі. Важливим етапом є вибір кількості шарів та нейронів, що вплине на ефективність навчання. Після тренування важливо перевірити, як мережа відпрацьовує вихідний масив, а також протестувати її на нових сигналах, які не використовувалися під час навчання, щоб оцінити здатність до самонавчання.

Аналіз технологічних координат вказує на необхідність створення оцінювача коефіцієнта корисної дії (ККД) насосу, оскільки безпосереднє вимірювання цього параметра є неможливим. Також потрібен оцінювач продуктивності через високу вартість відповідних датчиків. Розробка оцінювача ККД має свої особливості, оскільки ККД є нелінійною функцією, що залежить від робочих точок на напірних характеристиках. Один з можливих підходів до реалізації оцінювача ККД — це створення нейронної мережі, для якої потрібна інформація про робочі точки на різних швидкостях обертання двигуна. Точність оцінювача ККД залежить від кількості робочих точок, закладених у нейронну мережу, що дозволяє відтворювати значення ККД для заданої робочої точки.

Для формування бази даних робочих точок зручно використовувати каталожні характеристики насосів. Наприклад, було створено масив з 4000 робочих точок, що містить 265 статичних характеристик і характеристик ККД на швидкостях від 3000 об/хв до 350 об/хв з кроком 10 об/хв для насосу потужністю 160 кВт. Ці дані демонструють можливості оцінювача та його здатність до точного прогнозування ККД насосних установок.

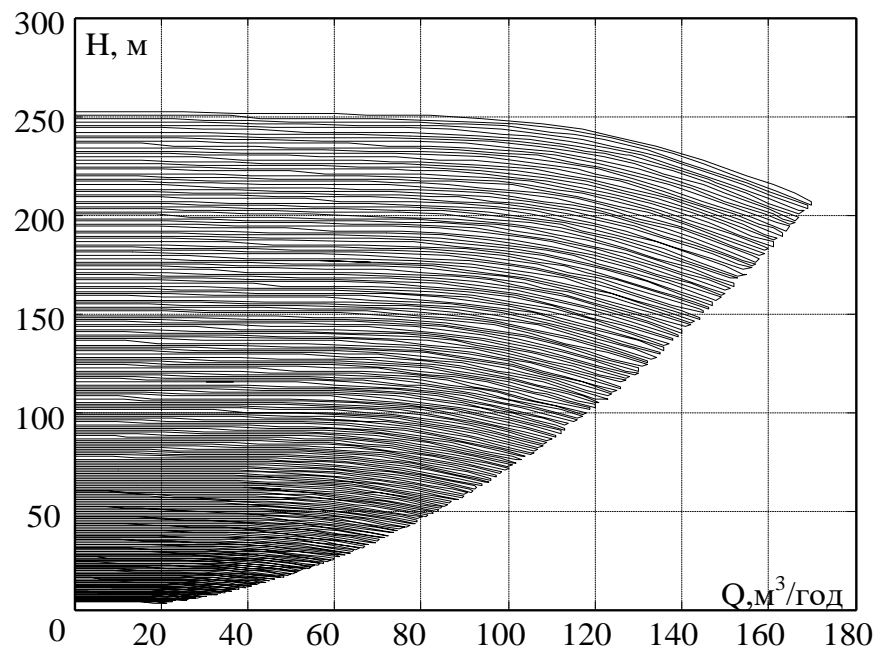


Рисунок 4.7 – Сімейство Q-H-характеристик насосу  
потужністю 160 кВт

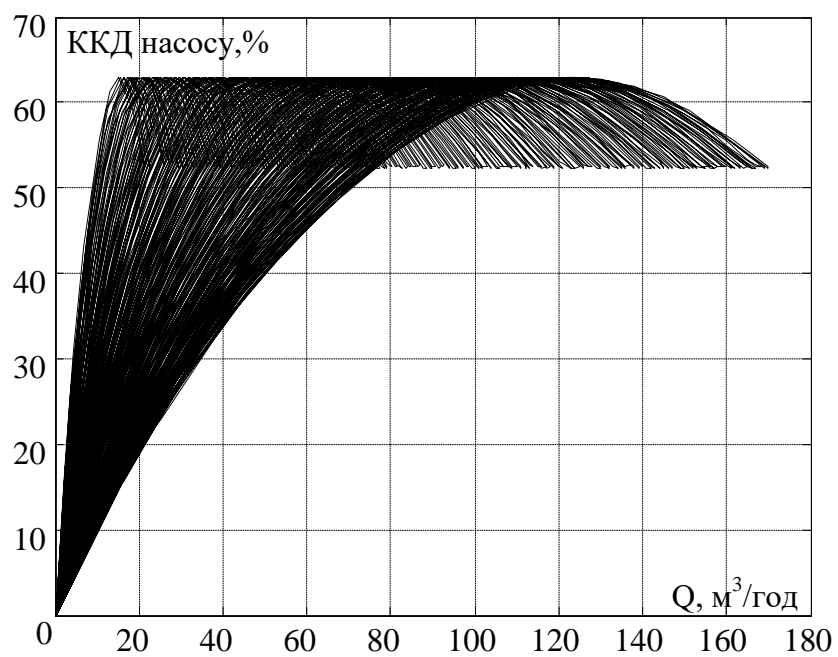


Рисунок 4.8 – Сімейство характеристик Q-ККД насосу  
потужністю 160 кВт

Для реалізації нейронної мережі, що оцінює коефіцієнт корисної дії (ККД) насосу, було використано пакет програм MatLab, зокрема редактор нейронних мереж. Вхідними даними для моделі стали масиви витрати (Q) та напору (H), кожен з яких містить 4000 точок. ККД виступає в ролі цільової функції, яку мережа повинна прогнозувати на основі цих вхідних параметрів.

Архітектура нейронної мережі була обрана двошаровою з прямим поширенням сигналів. У першому шарі розміщено десять нейронів, тоді як вихідний шар складається з одного нейрона, що відповідає за прогнозування ККД. Для активації нейронів у першому та другому шарах застосовано функцію гіперболічного тангенса, яка ефективно обробляє нелінійні залежності, тоді як вихідний шар використовує лінійну функцію активації, що дозволяє отримувати безперервні результати.

Навчання мережі здійснюється за допомогою алгоритму Левенберга-Марквардта, який відомий своєю швидкістю та стабільністю при вирішенні задач апроксимації. Обрана структура та параметри нейронної мережі забезпечують достатню гнучкість для адаптації до даних, що дозволяє точно прогнозувати значення ККД насосних установок. Після початкового навчання можливе подальше вдосконалення моделі шляхом аналізу отриманих результатів та коригування архітектури мережі для підвищення точності прогнозів. Результати тренування на рис. 4.9, графіки лінійної регресії показані на рис. 4.10.

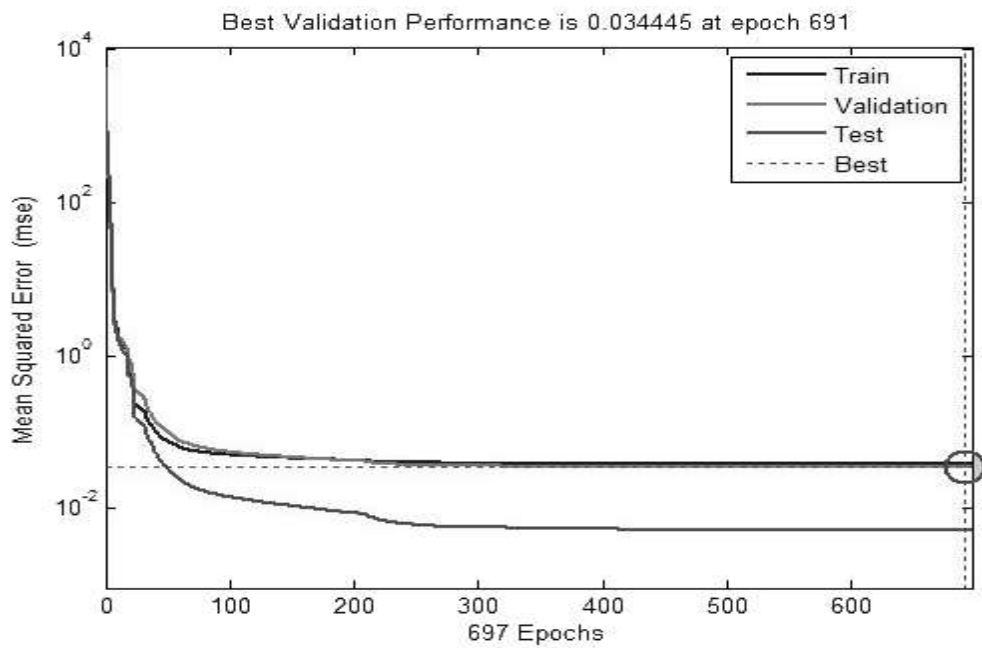


Рисунок 4.9 – Результати тренування двошарової НМ

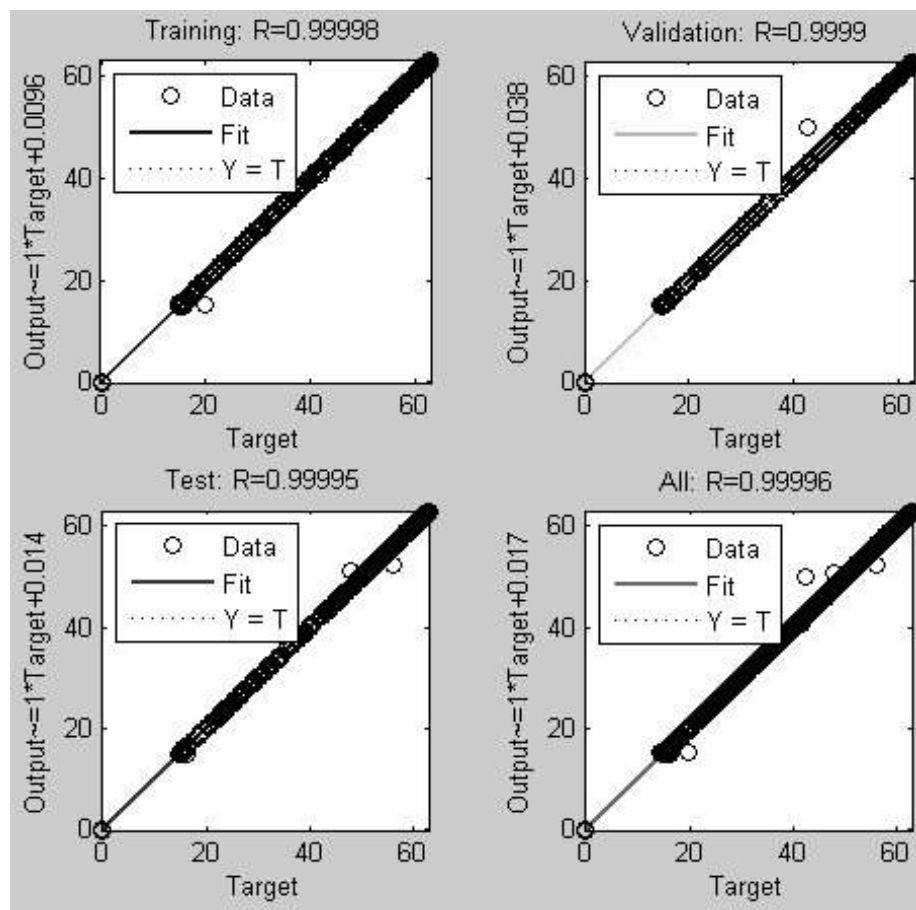


Рисунок 4.10– Графіки лінійної регресії для двошарової НМ

Як видно з рис. 2.6, тренування нейронної мережі вимагало здійснення 697 епох (циклів), коефіцієнт лінійної регресії відповідно до рис. 2.14 складає  $R=0.99998$ , похибка тренування НМ з рис. 2.13 складає 0.034, що є прийнятним для вихідної величини.

*Структурна схема системи автоматичного керування*

Структурна схема для дослідження системи з послідовно з'єднаними агрегатами має вигляд, що зображений на рис. 2.8.

Привідні асинхронні двигуни насосів описуються нелінійними двофазними моделями в нерухомій системі координат статора a-b. Перетворювач частоти реалізує квадратичний закон керування  $u/f^2 = \text{const}$ .

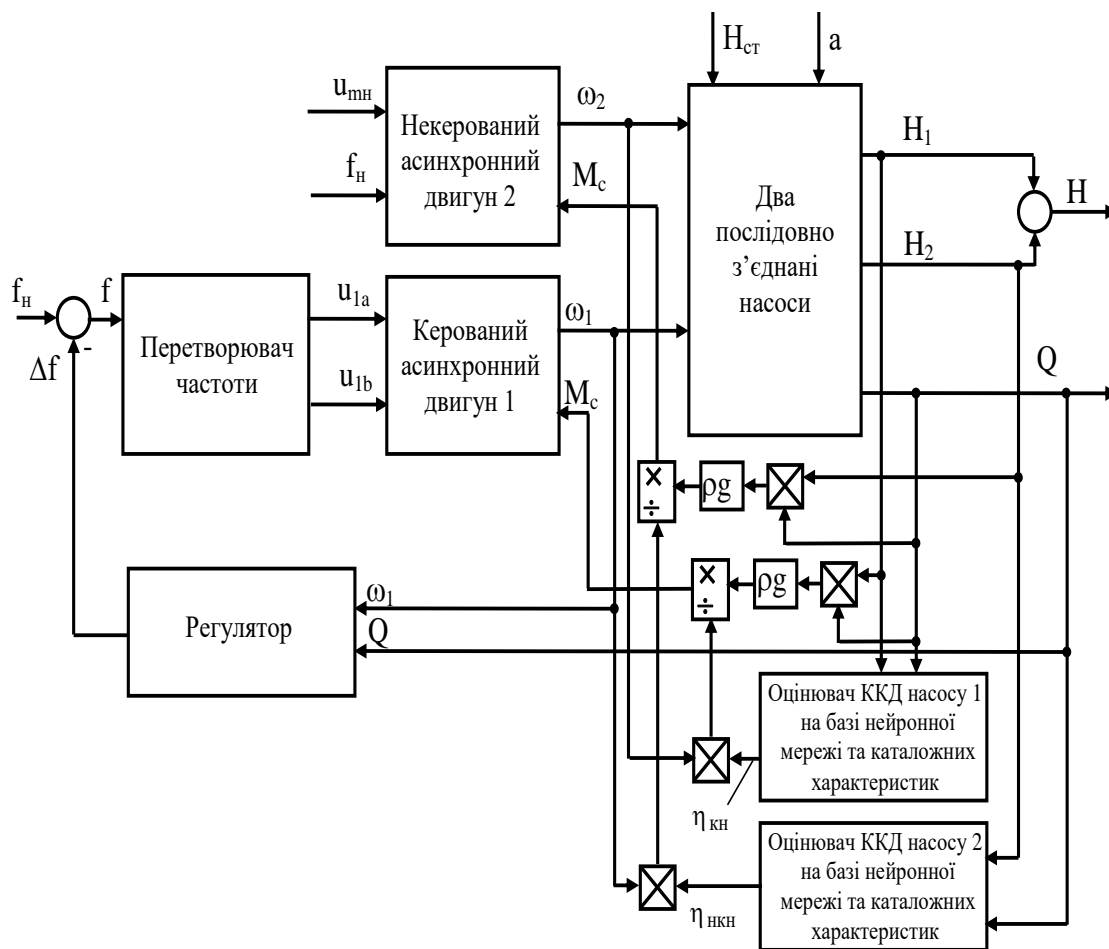


Рисунок 4.11 – Структурна схема електромеханічної системи автоматичного керування двома послідовно з'єднаними насосами водопостачання

На рис 4.11 зображена структурна схема електромеханічної системи автоматичного керування двома послідовно з'єднаними насосами до якої входять: два послідовно з'єднані насоси (4.1)–(4.6) з привідними асинхронними двигунами (4.17); оцінювачі ККД насосів, що побудовані на штучних нейронних мережах, регулятор(4.20);

Висновки до розділу.

В даному розділі дипломного проекту була представлена математична модель двох послідовно з'єднаних насосів, яка дозволяє врахувати динаміку зміни технологічних параметрів, а також враховує зміни параметрів гідравлічної мережі.

Розроблена математична модель регулятора ККД насосу на основі якої ми можемо спостерігати максимізацію ККД керованого насосу у наступному розділі. Також були розроблені оцінювач ККД на основі нейронної мережі та структурна схема системи автоматичного керування.

## 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДІНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Для дослідження вибрано два однакові насоси фірми VogelPumpen CNX-100-65-400 з наступними максимальними даними: потужність 156.1 кВт, напір 240 м, продуктивність 164.9 м<sup>3</sup>/год, ККД 62.9%, частота обертання 2900 об/хв. Номінальні дані приводних асинхронних двигунів наступні: потужність 160 кВт, синхронна частота обертання 3000 об/хв, ККД 96%, лінійна напруга 380 В, коефіцієнт потужності 0.9, ковзання 0.019, активний опір статора 0.0117 Ом, індуктивність статора 0.0126 Гн, активний опір ротора 0.0094 Ом, індуктивність ротора 0.0127 Гн, взаємна індуктивність статора та ротора 0.0124 Гн. При моделюванні прийнято  $H_{ст}=150$  м,  $\chi=0.5$  с/(м<sup>2</sup>/год), приведений момент інерції на валах двигунів  $J=1.4$  кг м<sup>2</sup>. Розрахункові параметри насосів на основі напірних характеристик є наступними:  $H_{01н}=H_{02н}=235$  м,  $a_{н1}=a_{н2}=9018$  1/(м<sup>5</sup>/с<sup>2</sup>).

У першому досліді гідравлічний опір змінюється стрибкоподібно як показано на рисунку 5.1, а.

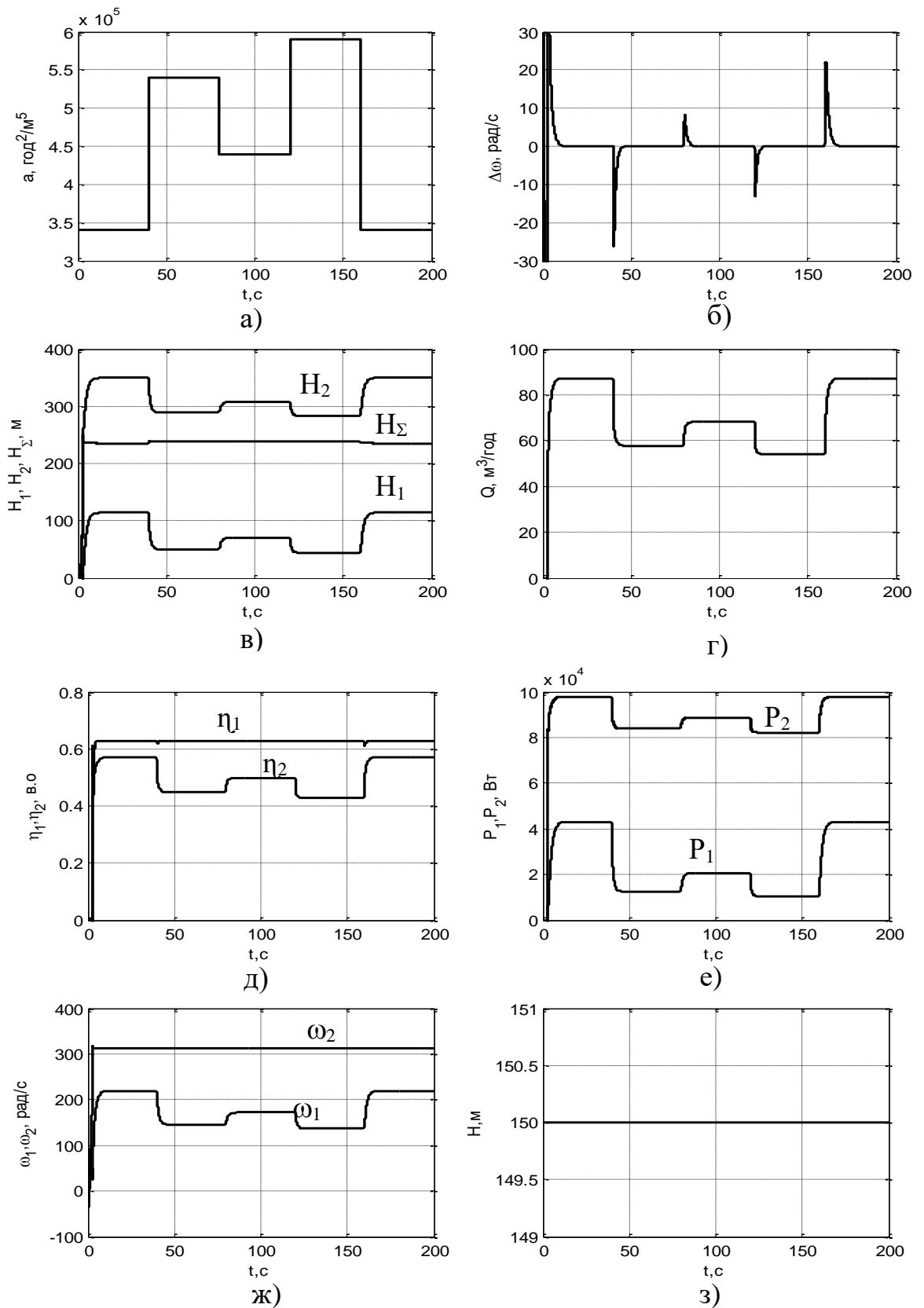


Рисунок 5.1 – Графіки перехідних процесів у системі з енергоефективним регулятором при стрибкоподібних варіаціях гідравлічного опору

У процесі роботи регулятора швидкість обертання двигуна, що контролюється, поступово зменшується, поки не досягне заданого значення швидкості, позначеного як  $\omega^*$ . Похибка в значенні швидкості,  $\Delta\omega$ , на кожному етапі зміни гідравлічного опору прагне до нуля, що ілюструється на рисунку 5.1, б.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) насосної системи, що підлягає регулюванню, досягає максимального значення, яке становить 62,9%, як показано на рисунку 5.1, д. Цей показник залежить від розташування робочої точки і може варіюватися в різних межах. Найбільш енергоефективним режимом роботи є той, у якому ККД некерованого насоса наближається до ККД керованого. Це можна побачити на рисунку 5.1, д, у проміжках часу від 0 до 45 секунд та від 160 до 200 секунд.

Графіки перехідних процесів напорів і продуктивності при зміні гідравлічного опору представлені на рисунках 5.1, в та г. Механічна потужність на валу керованого двигуна зменшується на 58 кВт (36% від номінальної потужності) при першій зміні гідравлічного опору, на 67 кВт (41% від номінальної потужності) при другій зміні, на 70 кВт (43% від номінальної потужності) при третій, на 72 кВт (45% від номінальної потужності) при четвертій, а також на 58 кВт (36% від номінальної потужності) при п'ятій зміні.

У другому експерименті гідравлічний опір змінюється відповідно до лінійного закону, що ілюструється на рисунку 5.2, а.

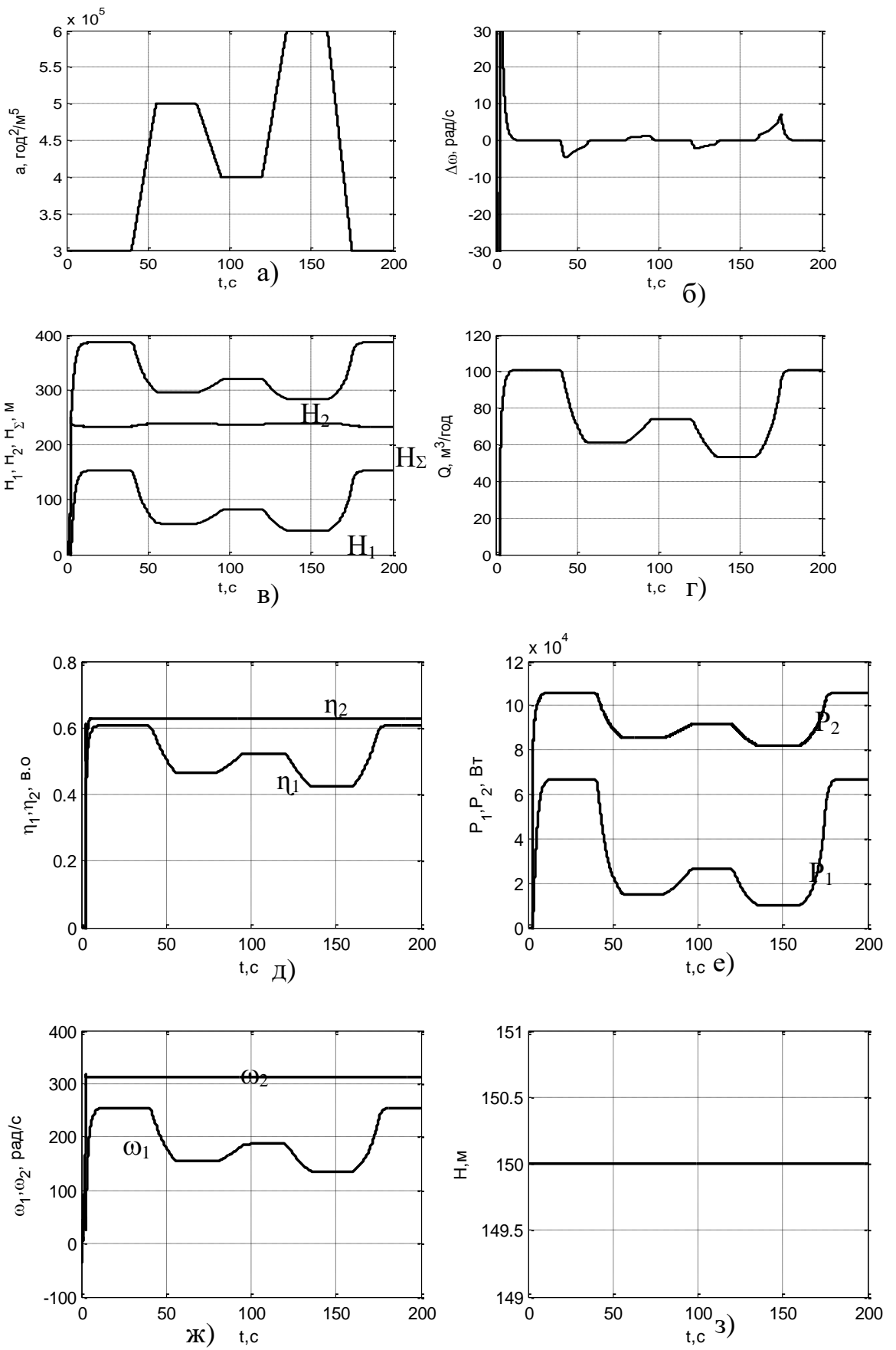


Рисунок 5.2 – Графіки перехідних процесів у системі з енергоефективним регулятором при лінійній зміні гідравлічного опору

У процесі роботи регулятора швидкість обертання керованого двигуна, позначена як  $\omega_1$ , зменшується до досягнення заданого значення швидкості  $\omega^*$ . Похибка в значенні швидкості,  $\Delta\omega$ , на кожному етапі зміни гідравлічного опору прагне до нуля, що ілюструється на рисунку 5.2, б.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) керованого насосу підвищується до максимального значення 62,9%, як показано на рисунку 5.2, д. Цей показник може змінюватися в різних межах, оскільки залежить від розташування робочої точки. Найвища енергоефективність спостерігається у проміжках, коли ККД некерованого насосу наближається до ККД керованого, що видно на рисунку 5.2, д, в проміжках часу від 0 до 45 секунд та від 160 до 200 секунд.

Графіки перехідних процесів напорів і продуктивності при варіаціях гідравлічного опору представлені на рисунках 5.2, в та г. Механічна потужність на валу керованого двигуна змінюється наступним чином: на 37 кВт (35% від номінальної потужності) при першій зміні гідравлічного опору, на 70 кВт (66% від номінальної потужності) при другій зміні, на 62 кВт (59% від номінальної потужності) при третій зміні, на 71 кВт (63% від номінальної потужності) при четвертій зміні, а також на 37 кВт (35% від номінальної потужності) при п'ятій зміні.

У третьому експерименті гідравлічний опір змінюється за плавним законом, що ілюструється на рисунку 5.3, а.

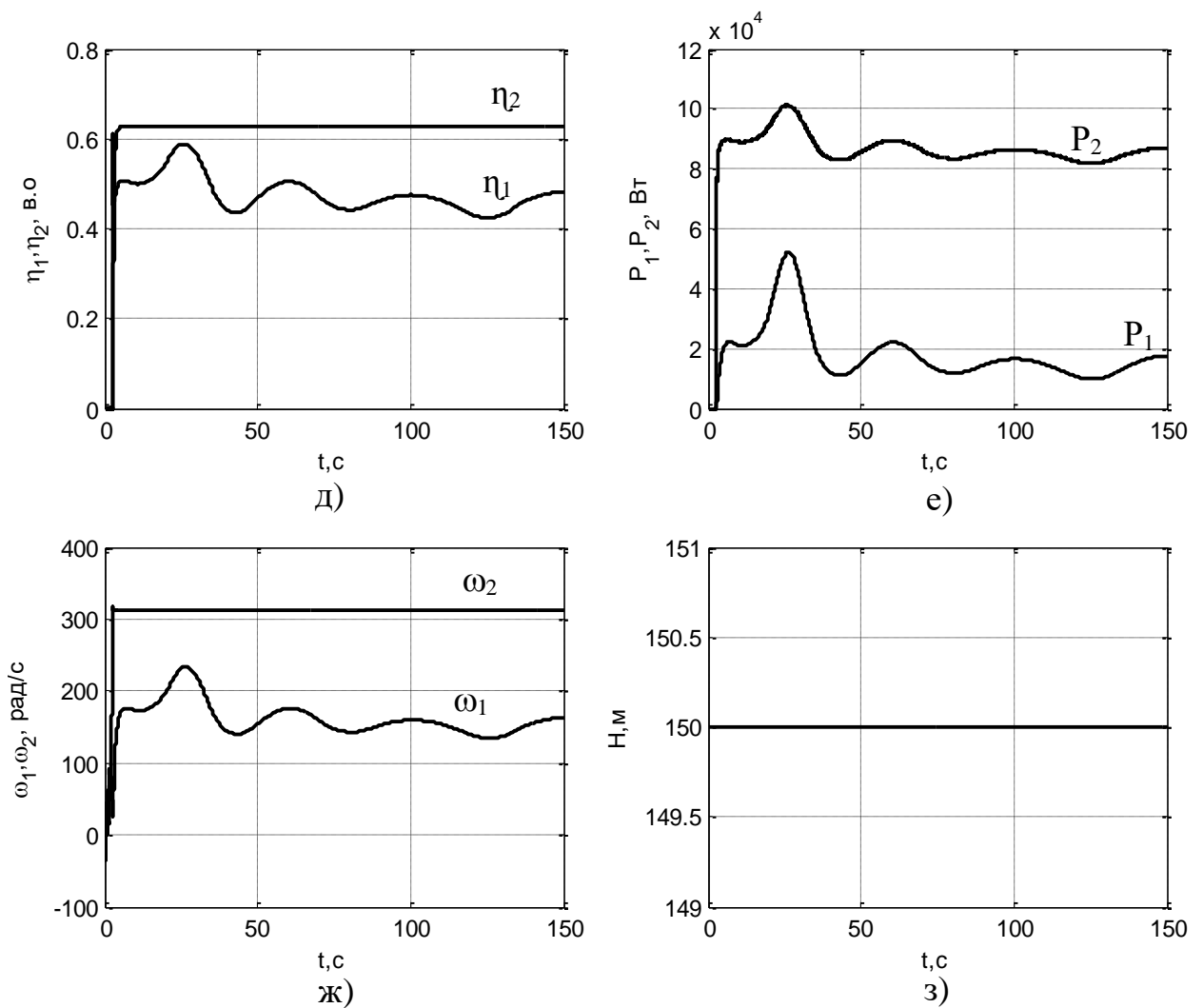


Рисунок 5.3 – Графіки перехідних процесів у системі з енергоефективним регулятором при плавній зміні гідравлічного опору

У результаті роботи регулятора швидкість обертання керованого двигуна  $\omega_1$  зменшуємо поки не досягне значення заданої швидкості  $\omega^*$ . Похибки за заданою швидкістю  $\Delta\omega$  на кожному проміжку зміни гідравлічного опору прямує до нуля, як показано на рисунку 5.3, б.

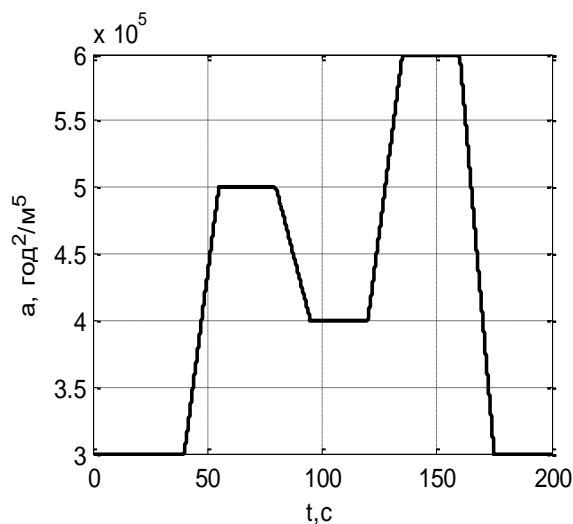
ККД керованого насосу підвищується до максимально можливого значення, яке складає 62,9%, як показано на рисунку 5.3, д.

ККД керованого насосу може змінюватися у довільних межах так як залежить від розташування робочої точки. Найбільша енергоефективність забезпечується у точках, де ККД некерованого насосу наближається до ККД керованого (на рис. 5.3, д).

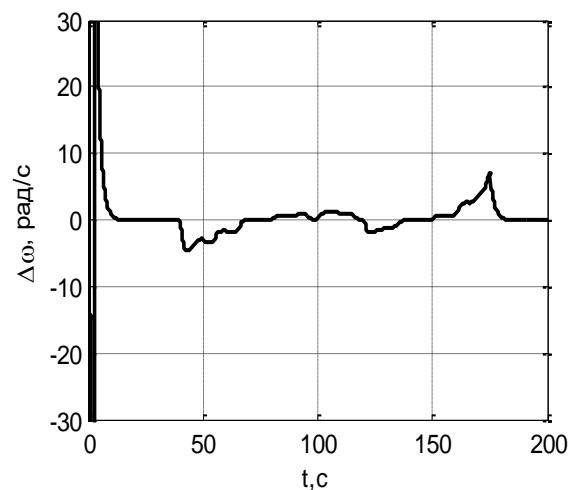
Графіки перехідних процесів напорів та продуктивності при варіаціях гідравлічного опору показані на рис 5.3, в та г.

Механічна потужність на валу керованого двигуна змінюється на величину від 50 до 70 кВт (47 - 66% від номінального значення)

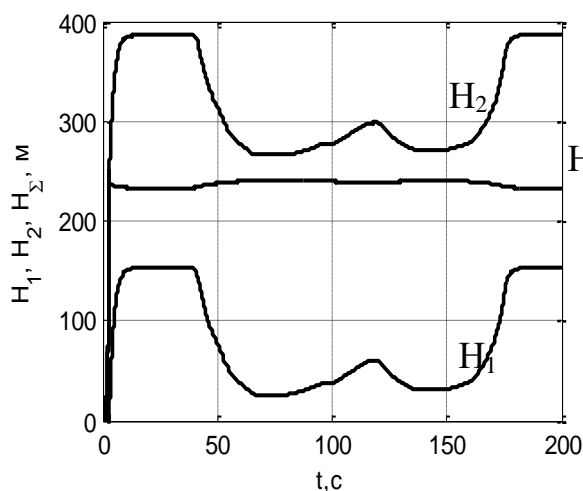
У деяких гідравлічних системах, наприклад у системах наповнення резервуару з нижнього рівня, присутня інша складова збурень – варіація гідростатичного напору  $H_{ст}(t)$ , так як при наповненні водою резервуару напір, що протидіє насосу, збільшується із збільшенням рівня води. Ця складова також впливає на розміщення робочої точки. Графіки перехідних процесів при наявності двох збурень  $a(t)$  (рис 5.3, а) та  $H_{ст}(t)$  (рис. 5.3, з).



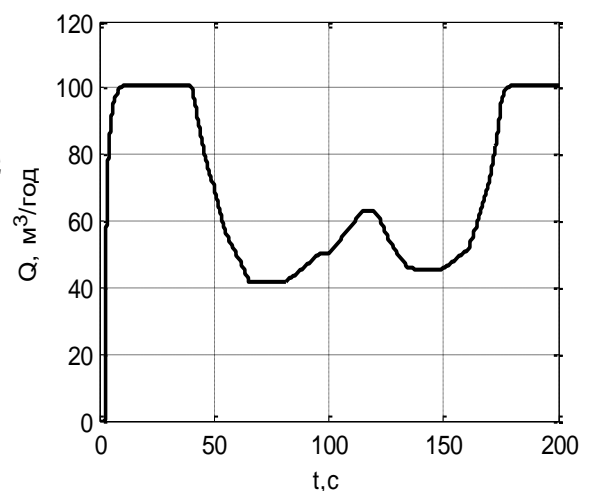
а)



б)



в)



г)

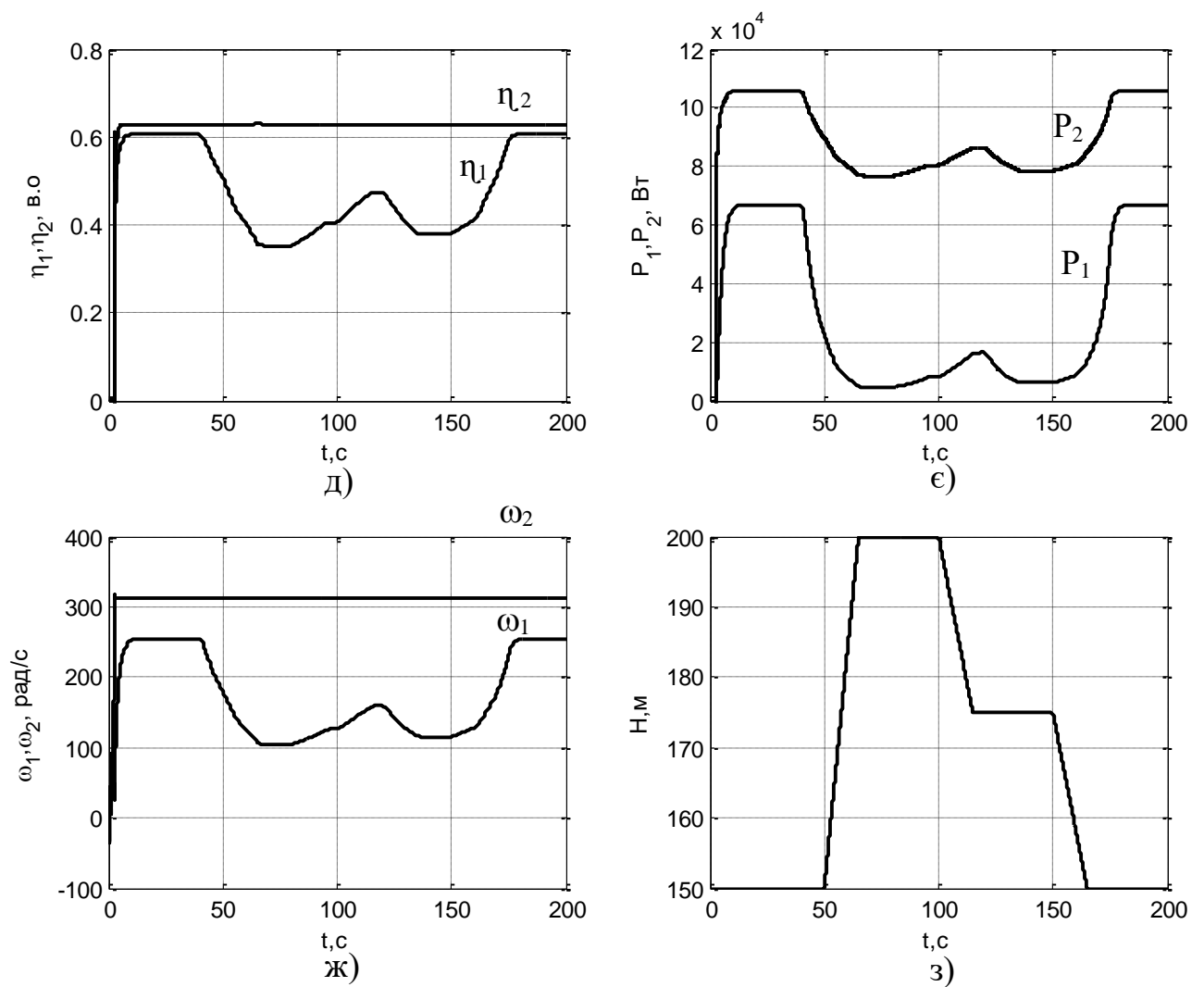


Рисунок 5.4 – Графіки перехідних процесів у системі керування при наявності двох збурень у гідравлічній системі (лінійні зміни гідравлічного опору та гідростатичного напору)

Після запуску системи, як показано на рисунку 5.4, коефіцієнт корисної дії (ККД) керованого насоса досягає максимального значення, яке становить 0,629. У випадку некерованого насоса, його ККД змінюється в залежності від початкового положення робочої точки, що може призвести як до зменшення, так і до збільшення цього показника.

На 45-й секунді спостерігається різке підвищення гідравлічного опору, що викликає зміщення робочої точки і, відповідно, підвищення ККД до максимальних значень. На 80-й секунді відзначається раптове зменшення

гідравлічного опору, після чого ККД керованого насосу знову досягає своїх найвищих показників.

У 50-й секунді відбувається поступове зростання геодезичного напору в системі від 150 до 200 метрів протягом 15 секунд. У цей момент виникає статична похибка, яка знову прагне до нуля після стабілізації геодезичного напору на рівні 200 метрів. Додатково, на 130-й та 160-й секундах спостерігаються різкі коливання гідравлічного опору, при цьому регулятор функціонує аналогічно, а похибка у відпрацюванні заданої швидкості залишається близькою до нуля.

Також на 100-й секунді геодезичний напір знижується з 200 до 150 метрів протягом 15 секунд. Після стабілізації цього параметра статична похибка за швидкістю знову досягає нульового значення.

Що стосується механічної потужності на валу керованого двигуна, то вона знижується в порівнянні з некерованим насосом. При першій зміні гідравлічного опору спостерігається зниження на 40 кВт, що становить 38% від номінальної потужності. Під час другої та третьої змін потужність зменшується на 70 кВт, що є 66% від номіналу. Четверта зміна показує зниження на 67 кВт, або 61% від номінальної потужності, а при п'ятій зміні знову фіксується зниження на 40 кВт, що відповідає 38% від номінальної потужності.

У п'ятому досліді гідравлічний опір змінюється сибкоподібно, як показано на рисунку 5.5, а. та гідростатичний напір змінюється лінійно.

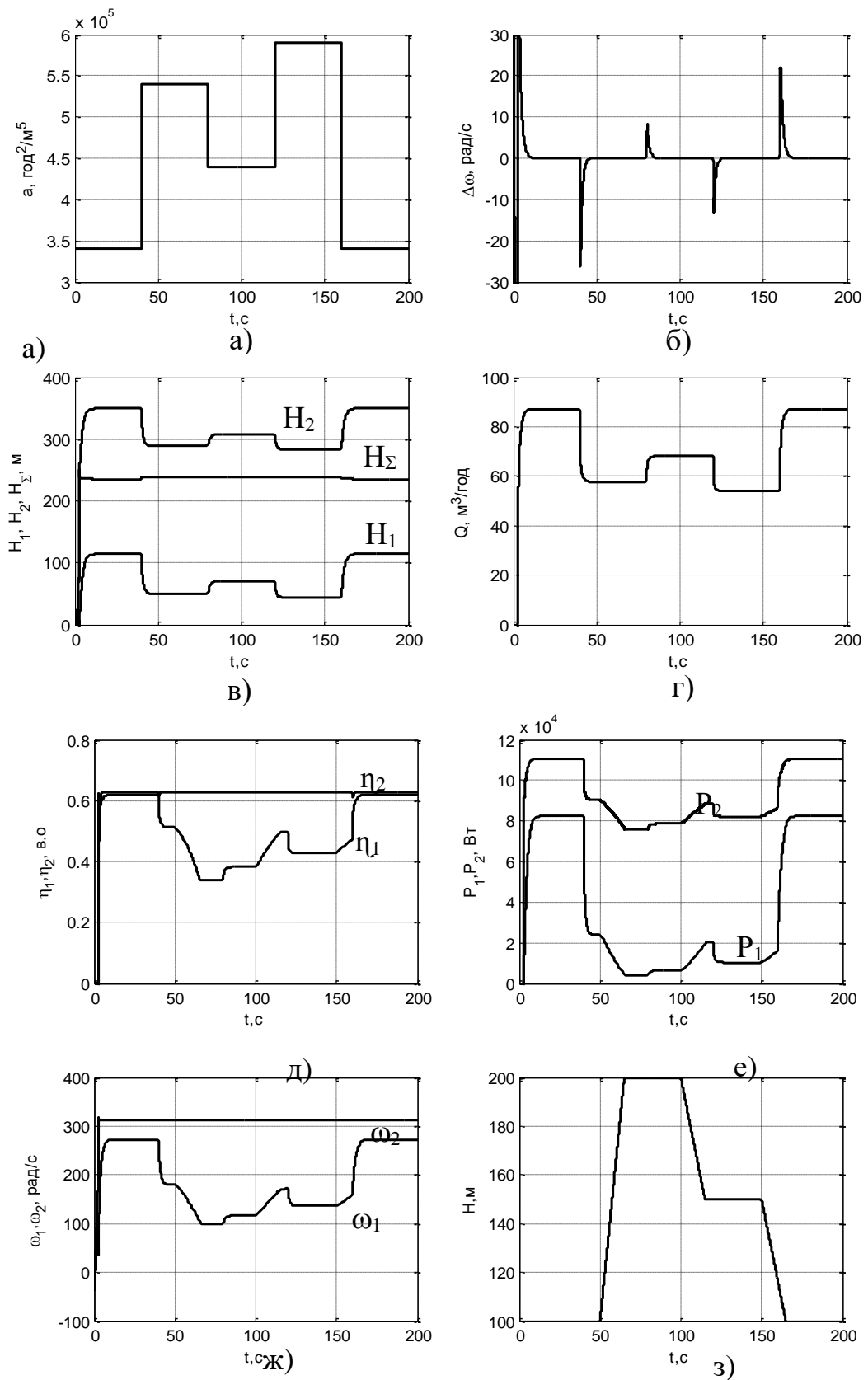
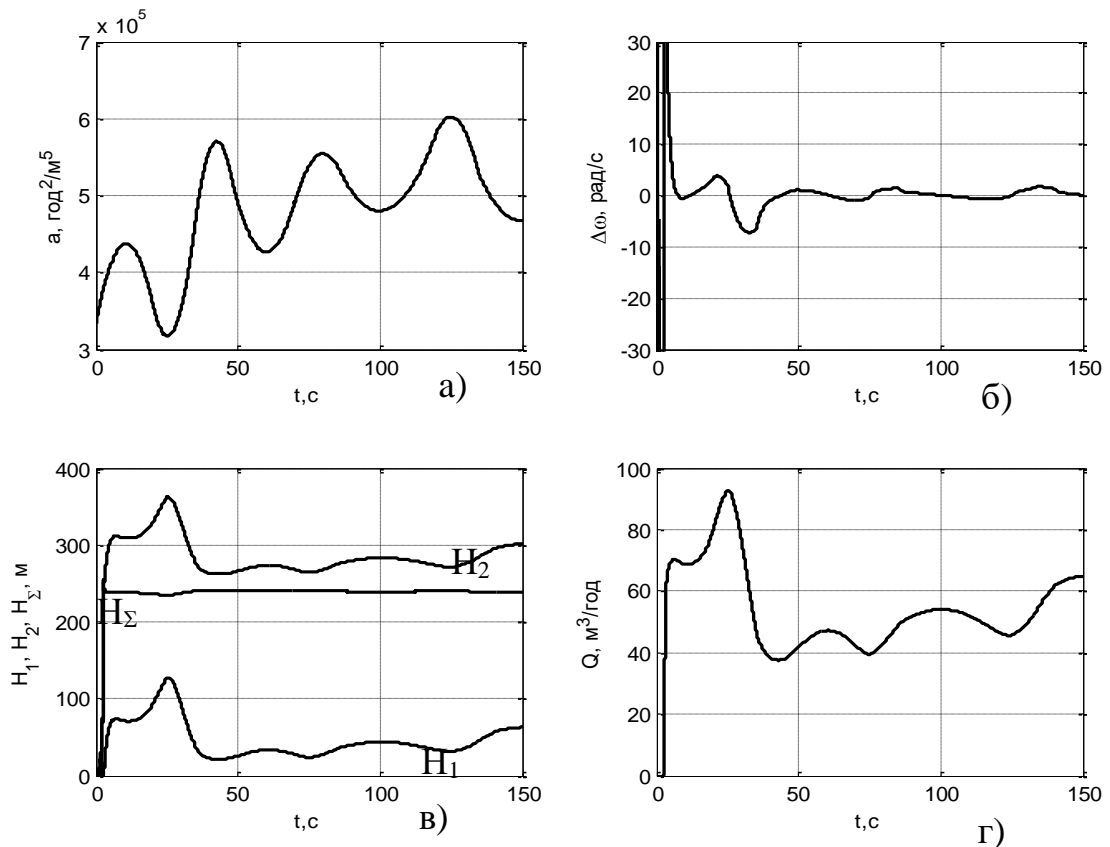


Рисунок 5.5 – Графіки перехідних процесів у системі керування при наявності двох збурень у гідравлічній системі (стрибкоподібна зміна гідравлічного опору та лінійна зміна гідростатичного напору)

У процесі роботи регулятора швидкість обертання керованого двигуна, поступово зменшується до досягнення заданого значення. Похибка на кожному етапі зміни гідравлічного опору прагне до нуля, що ілюструється на рисунку 5.5, б.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) керованого насосу підвищується до максимального значення, яке становить 62,9%, що також відображено на рисунку 5.5, д. Найвища енергоефективність спостерігається в тих точках, де ККД некерованого насосу наближається до ККД керованого насосу, як показано на цьому ж рисунку.

Зміни механічної потужності на валу керованого двигуна коливаються в межах від 27 до 10 кВт, що становить від 9% до 24% від номінального значення. У шостому експерименті гідравлічний опір змінюється за плавною залежністю, що ілюструється на рисунку 5.6, а.



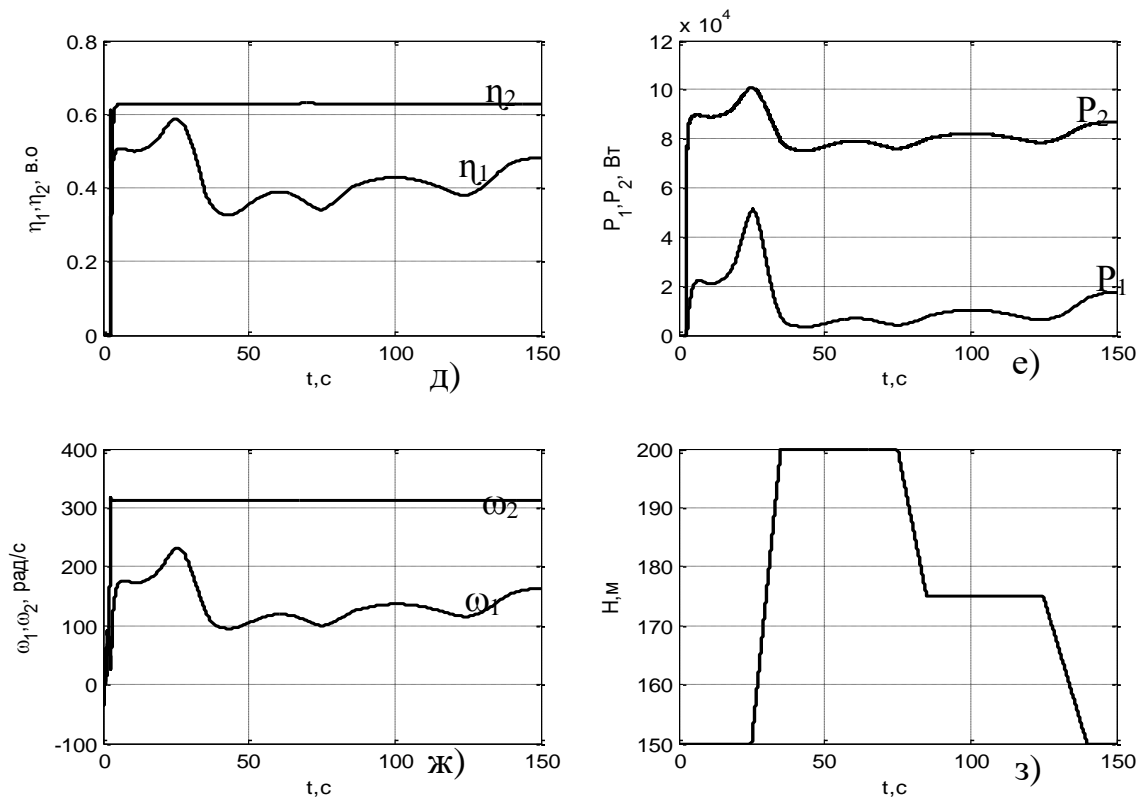


Рисунок 5.6 – Графіки перехідних процесів у системі керування при плавній зміні гідравлічного напору. (плавна зміна гідравлічного опору та лінійна зміна гідростатичного напору)

У результаті роботи регулятора швидкість обертання керованого двигуна  $\omega_1$  зменшуємо поки не досягне значення заданої швидкості  $\omega^*$ . Похибки  $\Delta\omega$  за заданою швидкістю на кожному проміжку зміни гідравлічного опору прямує до нуля, як показано на рисунку 5.6, б.

ККД керованого насосу підвищується до максимально можливого значення, яке складає 62,9%, як показано на рисунку 5.6, д.

Найбільша енергоефективність забезпечується у точках, де ККД некерованого насосу наближається до ККД керованого (на рис. 5.3, д).

Механічна потужність на валу керованого двигуна змінюється на величину від 50 до 70 кВт (50 – 70% від номінального значення)

## **Висновки до розділу.**

У п'ятому розділі були проведені дослідження системи автоматичного керування, зосереджені на варіаціях параметрів гідромережі. в рамках експериментів було здійснено шість досліджень, що охоплюють різні типи змін у гідравлічному опорі та гідростатичному напорі, в результаті чого отримані такі результати.

Під час стрибкоподібної зміни гідравлічного опору спостерігається максимізація коефіцієнта корисної дії (ккд) керованого насосу до 62,9%, при цьому механічна потужність коливається в межах 58–72 квт, що становить 36–45% від номінальної потужності.

У випадку лінійної зміни гідравлічного опору механічна потужність на валу керованого двигуна змінюється в діапазоні від 37 до 71 квт, що відповідає 35–63% від номінального значення.

При плавній зміні гідравлічного опору механічна потужність на валу двигуна коливається від 27 до 10 квт, що становить 9–24% від номінальної потужності.

Коли в системі спостерігаються два збурення — лінійні зміни гідравлічного опору та гідростатичного напору, потужність варіюється від 40 до 67 квт, що відповідає 38–61% від номінального значення.

У випадку стрибкоподібної зміни опору та лінійної зміни напору механічна потужність на валу керованого двигуна змінюється від 27 до 10 квт, що становить 9–24% від номінального значення.

При плавній зміні опору в поєднанні з лінійною зміною напору механічна потужність на валу двигуна варіюється в межах від 50 до 70 квт, що становить 50–70% від номінального значення.

## 6 РОЗРОБКА СХЕМИ КЕРУВАННЯ

Розробка електричної принципової схеми асинхронного електроприводу є важливим етапом у проектуванні систем автоматичного керування. Сучасні електроприводи змінного струму, які функціонують на основі перетворювачів частоти, мають складну структуру, що включає кілька ключових компонентів.

На початку системи зазвичай розташований вхідний фільтр, що зменшує коливання напруги та захищає від електромагнітних перешкод. Далі йде некерований випрямляч, який перетворює змінний струм на постійний, зазвичай за допомогою діодів. Щоб підтримувати стабільний рівень постійної напруги, використовується зарядне коло, яке забезпечує зарядку конденсаторів. Ємність фільтру, що розташована після випрямляча, допомагає зменшити пульсації напруги, забезпечуючи більш стабільний вихід.

Ще одним важливим елементом є клампер, який обмежує вихідну напругу, запобігаючи перевантаженню компонентів. Система також містить датчик напруги ланки постійного струму, що слідкує за рівнем DC напруги для регулювання. Інвертор, який перетворює постійний струм назад у змінний, регулює частоту та амплітуду для керування асинхронним двигуном.

Для забезпечення зворотного зв'язку та контролю використовуються датчики вихідного струму, які вимірюють вихідний струм. Схеми драйверів керують перемиканням ключів інвертора, що забезпечує належну роботу системи. Гальванічна розв'язка гарантує електричну ізоляцію між різними частинами системи, що підвищує безпеку.

Блок живлення постачає електричну енергію для контролера та інших компонентів. Цифровий контролер, що зазвичай базується на цифровому сигнальному процесорі, відповідає за обробку сигналів і управління роботою системи. Окрім того, схеми узгодження сигналів забезпечують правильну взаємодію між елементами, адаптуючи сигнали до необхідних рівнів.

У загальному, силова частина відповідає за перетворення енергії та постачання її асинхронному двигуну, в той час як керуючий контролер займається управлінням і моніторингом електроприводу, реалізуючи алгоритми регулювання та обробки даних. Така структура дозволяє створити ефективну та надійну автоматизовану систему для асинхронних електроприводів, що відповідає сучасним промисловим вимогам. Розглянемо більш детально призначення основних модулів та елементів, показаних на рис. 7.1:

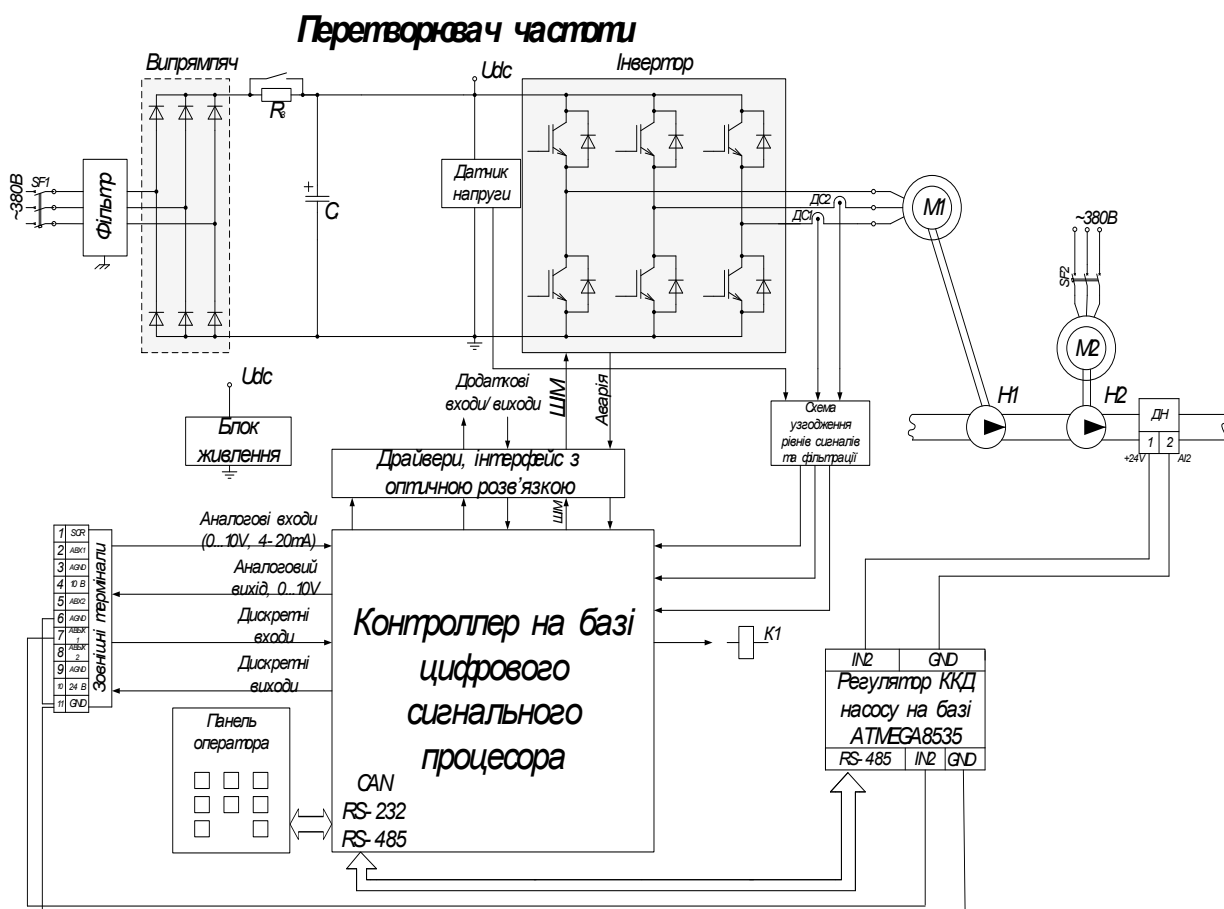


Рисунок 7.1. – Схема електрична принципова

Фільтр – як правило складається з двох основних складових: варисторів для запобігання перенапругам в ланці постійного струму внаслідок сплесків напруги мережі живлення, та фільтру радіоперешкод, який запобігає розповсюдженню в мережу живлення високочастотних перешкод, які виникають при комутації ключів інвертора.

Випрямляч – перетворює змінну напругу мережі живлення в постійну напругу ланки постійного струму  $U_{dc}$ .

Ємність  $C$  – фільтр, призначений для згладжування випрямленої напруги на виході випрямляча.

Зарядне коло (резистор  $R_z$  та реле  $K1$ ) – забезпечують плавний заряд ємності фільтру випрямляча  $C$  при подачі живлення на перетворювач. Після закінчення заряду контакт реле  $K1.1$  замикається.

Датчик напруги – призначений для передачі в керуючий контролер інформації про напругу ланки постійного струму  $U_{dc}$ , де вона використовується для забезпечення захисних функцій, контролю заряду ємності фільтру випрямляча, а також для генерування імпульсів керування ключами інвертора по законам широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Інвертор – перетворює постійну напругу ланки постійного струму у задану трифазну напругу на виході перетворювача, результуючий вектор якої (усереднений на періоді ШІМ) має заданий модуль, частоту та кутове положення.

Датчики струму  $ДС1$ ,  $ДС2$  – призначені для передачі в керуючий контролер інформації про фазні струми двигуна, де вона використовується для організації захисних функцій інвертора та двигуна, а також для організації зворотних зв'язків в системах векторного керування.

Драйвери – перетворюють параметри імпульсів керування силовими ключами, які надходять від контролера, з метою забезпечення надійного відкриття та запирання IGBT ключів. Фактично драйвери можна розглядати як підсилювачі сигналів. Досить часто драйвери додатково забезпечують захист від струмів короткого замикання інвертора.

Опторозв'язка – забезпечує гальванічну розв'язку дискретних сигналів керування з метою підвищення завадозахищеності керуючого контролера, а також для запобігання виходу його з ладу при аварійних режимах в силовій

частині. Виконується за допомогою оптопар, або оптоволоконних ліній зв'язку у перетворювачах великої потужності.

Керуючий контролер – виконує всі функції автоматизації перетворювача, отримання завдання на регульовані координати, розраховує алгоритм керування двигуном, генерує імпульси керування ключами, реалізує захисні функції, здійснює комунікації з системами верхнього рівня.

Схеми узгодження рівнів сигналів та фільтрації – необхідна для приведення рівнів сигналів, які отримуються від датчиків струму та напруги до рівнів допустимої вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача керуючого контролера. Фільтрація може застосовуватися для підвищення завадостійкості системи керування.

Блок живлення – пристрій який забезпечує живлення власних потреб перетворювача: живлення контролера, драйверів, зовнішні +10 В та +24 В, живлення датчиків та ін. В сучасних перетворювачах вхідна напруга для блоку живлення власних потреб береться від ланки постійного струму, що забезпечує безпечну зупинку системи при зникненні напруги мережі живлення.

Зовнішні термінали – служать для підключення до перетворювача дискретних входів/виходів (наприклад сигналів керування перетворювачем «Пуск», «Стоп», «Реверс», інших), аналогових входів/виходів (наприклад завдання швидкості, зворотного зв'язку за технологічним параметром та інших).

Панель оператора – призначена для налаштування параметрів системи, подачі команд перетворювача та завдання на регульовану величину в ручному режимі, спостереження за контрольними величинами та діагностики.

Додаткові входи виходи – призначені для керування додатковими системами, наприклад для включення вентиляторів системи охолодження, контролю спрацювання зарядного реле та ін.

Некерований двигун підключається до мережі за допомогою силового контактору. При надмірному тиску у системі цей двигун можна відключити.

Контролер на базі ATMEGA8535 вимірює сигнал продуктивності та сигнали з аналогового виходу перетворювача частоти, що пропорційний частоті, реалізує алгоритм керування (4.20)-(4.21) та за допомогою інтерфейсу RS-485 керує частотою обертання перетворювача частоти.

### **Висновок до розділу.**

У даному розділі була проведена розробка електричної принципової схеми асинхронного електроприводу. також ми визначили елементи з яких вона складається.

Типова електричну принципова схема сучасного електроприводу змінного струму, побудованого на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму та показана на рис. 7.1. З рисунку видно, що в основу асинхронного електроприводу складає перетворювач частоти, який поєднує в собі перетворювальний та керуючий пристрій з класичного визначення електроприводу.

## ВИСНОВКИ

Математично обґрунтовано основи енергоефективного управління коефіцієнтом корисної дії (ККД) та створено відповідні математичні моделі, що включають асинхронні електродвигуни. На базі цих моделей були розроблені електромеханічні системи автоматизованого управління, які забезпечують підвищення енергоефективності в порівнянні з традиційними підходами.

Розроблені регулятори енергоефективності здатні забезпечити зниження витрат електроенергії до 33%. Дослідження підтверджують, що енергоефективність може бути досягнута навіть за умов наявності збурень у системі. Окрім того, впроваджені оцінювачі ККД дозволяють зменшити кількість датчиків у системі, що, в свою чергу, суттєво знижує витрати на систему управління, особливо в аспекті регулювання продуктивності.

Типова електрична схема сучасного електроприводу змінного струму, яка базується на частотному перетворювачі з постійним струмом, демонструє, що основою асинхронного електроприводу є саме частотний перетворювач. Цей пристрій об'єднує функції як перетворення, так і управління, відповідно до традиційного визначення електроприводу.

