

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____ 2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**“ Оптимізація енергоефективності та експлуатаційної
надійності асинхронних електроприводів насосних
установок”**

Виконав здобувач вищої освіти
ІІ курсу магістратури, групи ЕНМ-22М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Андрій ЧЕРНАЙ
« ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи професор, к.т.н.
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЕШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Чернай Андрій Євгенійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Оптимізація енергоефективності та експлуатаційної надійності асинхронних електроприводів насосних установок**

Optimisation of energy efficiency and operational reliability of asynchronous electric drives for pumping units

2. Керівник роботи (проекту) Плешков Петро Григорович, к.т.н., професор

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 25.12.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____

Вступ; Аналіз методів та засобів для забезпечення ефективної роботи асинхронного приводу насосного агрегата; Споживання та втрати електричної енергії в електроприводах насосів; Регульований електропривод, як основа енергозбереження режимів роботи насосних установок; Енергоефективна структура насосної станції з асинхронними електроприводами; Охорона праці; Висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	15.10.23	
2	<i>Аналіз методів та засобів для забезпечення ефективної роботи асинхронного приводу насосного агрегата</i>	22.10.23	
3	<i>Споживання та втрати електричної енергії в електроприводах насосів</i>	4.11.23	
4	<i>Регульований електропривод, як основа енергозбереження режимів роботи насосних установок</i>	12.11.23	
5	<i>Енергоефективна структура насосної станції з асинхронними електроприводами;</i>	24.11.23	
6	<i>Охорона праці</i>	02.12.23	
7	<i>Висновки</i>	10.12.23	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	22.12.23	
9	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	25.12.23	

Дата видачі завдання

Підпис керівника _____

«____» _____ 2023 р.

Петро ПЛІШКОВ

Завдання прийнято до виконання

Підпис здобувача _____

«____» _____ 2023 р.

Андрій ЧЕРНАЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 107 с.; 37 рис.; 7 табл.; 13 джерел.

Чернай А.Є. Оптимізація енергоефективності та експлуатаційної надійності асинхронних електроприводів насосних установок. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єктом досліджень є асинхронні електроприводи насосних агрегатів.

Предмет досліджень – виявлення методів та засобів оптимізації та експлуатаційної надійності асинхронних двигунів.

Метою роботи є дослідження роботи асинхронних електроприводів насосних станцій з метою покращення їх експлуатації.

В роботі проведено аналіз режимів роботи асинхронних двигунів насосної станції та запропоновано методи підвищення.

Проведено аналіз різних засобів управління електродвигунами насосів, які враховують особливості навантаження та відповідають сучасним вимогам до насосного обладнання. Ці засоби спрямовані на оптимізацію енергоефективності роботи насосних агрегатів з асинхронними електроприводами, автоматизацію процесу керування, діагностику обладнання та надання інформації про технічний стан електродвигуна і насоса.

Для визначення оптимальності роботи двигунів досліджено прогнозування витрат електроенергії.

Розроблена енергоефективна структура насосної станції з асинхронними електроприводами. Найбільш ефективним способом оптимізації регулювання режимів роботи насосних станцій є використання різних видів регульованих електроприводів. Вибір регульованого електроприводу повинен базуватися на результатах техніко-економічних розрахунків та порівняння різних варіантів.

Ключові слова: асинхронний двигун, втрати електроенергії, ефективна робота насосних агрегатів, надійність електропривода.

ABSTRACT

Qualification work: 107 p.; 37 Fig.; 7 tables; 13 sources.

A. Chernay. Optimization of energy efficiency and operational reliability of asynchronous electric drives of pumping units. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of research is asynchronous electric drives of pumping units.

The subject of research is the identification of methods and means of optimization and operational reliability of asynchronous motors.

The purpose of the work is to study the operation of asynchronous electric drives of pumping stations with the aim of improving their operation.

In the work, an analysis of the operation modes of asynchronous motors of the pumping station was carried out and methods of improvement were proposed.

An analysis of various means of controlling electric motors of pumps, which take into account the specifics of the load and meet modern requirements for pumping equipment, was carried out. These tools are aimed at optimizing the energy efficiency of pumping units with asynchronous electric drives, automating the control process, diagnosing equipment and providing information about the technical condition of the electric motor and pump.

To determine the optimal operation of the engines, the forecasting of electricity consumption was studied.

An energy-efficient structure of a pumping station with asynchronous electric drives has been developed. The most effective way to optimize the regulation of pump station operating modes is the use of various types of regulated electric drives. The choice of an adjustable electric drive should be based on the results of technical and economic calculations and a comparison of different options.

Key words: asynchronous motor, power losses, efficient operation of pumping units, reliability of the electric drive.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ НАСОСНОГО АГРЕГАТА.....	9
2 СПОЖИВАННЯ ТА ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ НАСОСІВ.....	18
2.1. Споживання електроенергії основними насосними агрегатами.....	18
2.2. Баланс енергоспоживання.....	25
2.3. Втрати енергії в насосних установках, пов'язані з нераціональним підвищенням напору.....	27
2.4. Втрати електроенергії при роботі насосів в режимах відхилення від номінального.....	31
3 РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЯК ОСНОВА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАСОСНИХ УСТАНОВОК.....	34
3.1. Регулювання частоти обертання електродвигунів.....	36
3.2. Регульовані електроприводи з використанням варіаторів частоти обертання.....	46
3.3. Застосування гідравлічного каскаду.....	48
3.4. Оптимізація режимів роботи частотнорегульованого асинхронного електропривода.....	51
4 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СТРУКТУРА НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ З АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ.....	57
4.1. Економічний ефект регулювання частоти обертання насосів при зміні графіку водоспоживання.....	58
4.2. Економічна доцільність сумісної роботи регульованих та нерегульованих електроприводів.....	66

4.3.	Вибір оптимального варіанту конфігурації насосної станції.....	77
5	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	83
5.1.	Організація та здійснення ремонтних заходів в електроустановках...	83
5.2.	Заходи технічного характеру для забезпечення безпеки при експлуатації електроустановок на підприємстві.....	85
5.3.	Заходи технічного характеру для забезпечення безпеки при експлуатації асинхронних двигунів на підприємстві.....	91
5.4.	Основні вимоги безпеки при експлуатації насосних станцій.....	97
	ВИСНОВКИ.....	104
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106

ВСТУП

Останнім часом, внаслідок зростання вартості енергоресурсів, спостерігається тенденція до збільшення цін на електроенергію. Цей фактор, разом із високою енергоємністю насосного обладнання (приблизно п'ята частина загальної енергії, яка виробляється в країні), підштовхує до пошуку нових методів та засобів для скорочення витрат електроенергії електроприводами насосів при забезпеченні водними потребами споживачів.

Однією з областей використання насосних агрегатів із застосуванням електроприводів двигунів середньої та великої потужності являються системи водопостачання населених пунктів. Насосна станція повинна забезпечувати подачу води, яка відповідає змінюючимся потребам споживачів протягом доби. Тому необхідно регулювати продуктивність насосного агрегата. Будь-яке відхилення його продуктивності від номінального значення призводить до додаткових витрат енергії. В умовах таких обставин велике значення має оптимізація роботи електроприводів насосної станції водопостачання.

Для регулювання результативності насосної станції часто використовують зміну кількості працюючих насосних агрегатів, при цьому їхні двигуни запускаються безпосередньо з електричної мережі. На двигуни середньої та великої потужності накладаються технічні обмеження стосовно прямого пуску, які доповнюються необхідністю дотримання пауз між пусками. Тому при досягненні необхідного значення результативності насосної станції вкрай важливо враховувати особливості пуску двигунів насосів.

Отримання необхідного обсягу подачі води в мережу є найефективнішим за допомогою регульованого електроприводу. Порівняно із змінами гідравлічних параметрів трубопроводу чи насоса, використання регульованого електроприводу дозволяє розширити діапазон регулювання

продуктивності насосного агрегата і при цьому значно зменшити споживання електроенергії його двигуном. Незважаючи на відносно високу вартість конвертуючого обладнання, термін окупності є коротким і може становити всього кілька місяців. Однак, оскільки насосна станція є складною системою, зміна параметрів одного насосного агрегата може впливати на параметри інших. Таким чином, при використанні регульованого приводу, важливо вирішити питання оптимальної взаємодії роботи насосів та розглянути доцільність встановлення перетворювачів на кожний двигун насосного агрегата.

Враховуючи вищезазначене, ключовим стає питання оптимального керування асинхронними приводами насосних агрегатів станції водопостачання, з мінімізацією витрат електричної енергії. Це передбачає узгоджену роботу насосів, яка забезпечить необхідний рівень продуктивності, враховуючи обмеження на прямий пуск привідних двигунів та забезпечить їхню інтеграцію у мережу споживача.

Важливість надійності роботи асинхронних двигунів у системах водопостачання важко переоцінити, оскільки це безпосередньо впливає на нормальне функціонування і надійність систем.

Асинхронні двигуни використовуються для приводу насосів у водопостачальних системах. Їхні неперервний та надійний робочий режим визначає постійну доступність води для споживачів. В надійних системах водопостачання мінімізується ризик аварій та виникнення ситуацій безводдя, що може призвести до негативних наслідків для населення та підприємств.

Надійність роботи двигунів важлива для забезпечення ефективної експлуатації системи водопостачання та мінімізації витрат енергії.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

Досягнення ефективності у роботі насосного агрегата забезпечується утриманням максимального значення його коефіцієнта корисної дії (ККД), що досягається за допомогою використання частотного методу регулювання. Використання регульованих електроприводів насосів дозволяє оптимізувати їхню роботу у різних режимах, забезпечуючи м'який пуск, безшовне регулювання швидкості, працездатність з необхідною швидкістю та високі показники енергоефективності електропривода (ККД та коефіцієнт потужності) [4]. Це сприяє підвищенню якості та ефективності роботи системи водопостачання.

У порівнянні з регульованими приводами постійного струму, частотно-регульовані електроприводи забезпечують експлуатаційні економії, оскільки базуються на асинхронних двигунах. Сучасні частотно-регульовані приводи, які включають в себе внутрішню мікропроцесорну систему управління і виснащені стандартизованими інтерфейсами, надають інформацію щодо енергетичних (потужність, витрати електроенергії, коефіцієнт потужності, струми і напруга), виробничих (тривалість роботи, час пуску, час зупинки, аварійні ситуації) і технологічних (витрати, тиск, температура, відхилення поточного значення контролюваного параметра від заданого) параметрів роботи як самого привода, так і технологічного устаткування. Застосування частотно-регульованих приводів виявляє найбільший ефект при їхньому інтегруванні в автоматизовані системи управління технологічними і виробничими процесами, де вони служать джерелом інформації та елементом управління технологічним процесом.

Через використання частотно-регульованих приводів разом із стандартними датчиками і виконавчими механізмами забезпечується

своєчасний моніторинг ходу технологічного процесу та високоточне, надійне регулювання його параметрів. Отримані з частотно-регульованих приводів [13] виробничі та енергетичні показники надають реальні дані для системи технічного обліку витрати енергоресурсів та системи управління виробничими процесами класу MES. Ця інформація використовується для оцінки ефективності використання технологічного обладнання та якості технологічного процесу в реальному часі. Розрахунки, підтверджені умовами промислової експлуатації, показують, що термін окупності систем частотно-регульованого електроприводу становить від 0,5 до 2 років і постійно зменшується внаслідок зростання цін на електроенергію і енергоносії.

В країнах провідних виробників електротехнічного обладнання, таких як Велика Британія, США, Франція, Данія, Фінляндія, Японія і Німеччина, енергозберігаючі частотно-регульовані електроприводи для насосних агрегатів вже давно виготовляються серійно. На сьогодні ці компанії можуть постачати такі електроприводи в діапазоні потужностей від одиниць до 1000 кВт та навіть більше. Україна також виробляє частотно-регульовані електроприводи для менших потужностей (250–320 кВт) з використанням тиристорних перетворювачів частоти. Ці пристрої виробляються підприємствами, такими як ХЕМЗ у Харкові та "Преобразователь" у Запоріжжі.

У роботі [2] розглядається питання визначення оптимального режиму роботи насосної станції (НС). Для забезпечення продуктивності станції використовуються різні комбінації увімкнених насосів, де групи різних насосів можуть забезпечувати однакову подачу. Однак цей підхід має обмеження, оскільки продуктивності насосів вважаються постійними, і не враховується питання регулювання подачі кожного насоса.

Інші дослідження розглядають можливість регулювання продуктивності насосної станції для забезпечення необхідної подачі. При цьому враховуються додаткові витрати енергії при відхиленні подачі від

номінального значення. Підхід також включає врахування тривалості напруження ресурсу при виборі оптимальної кількості працюючих агрегатів.

Однак цей метод не враховує сумісну роботу насосів, де подача кожного насоса залежить від режиму роботи інших агрегатів. Також важко застосовувати ці підходи до частотно-регульованих приводів, оскільки зменшення продуктивності насоса в такий спосіб призводить до економії енергії, а не до додаткових витрат.

На рисунку 1.1 представлена функціональна схема електромеханічної системи автоматичного керування (ЕМСАК) насосної установки, яку запропоновано в [5].

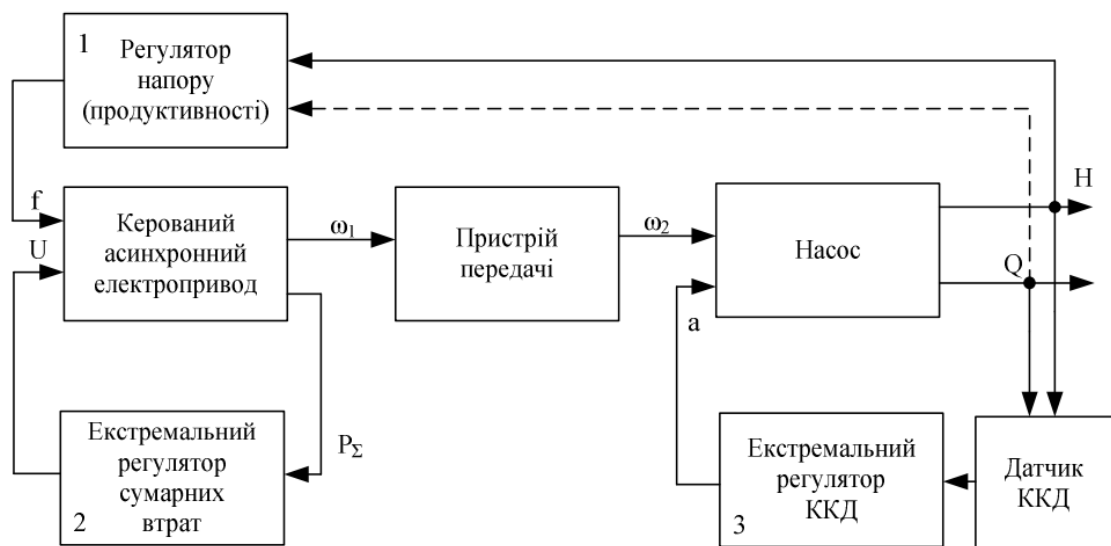


Рисунок 1.1 - Функціональна схема установки екстремальної енергозберігаючої ЕМСАК.

Енергозберігаюча ЕМСАК вирізняється тим, що основні завдання стабілізації продуктивності або напору виконуються за допомогою головного регулятора 1. Завдання щодо енергозбереження ЕМСАК виконується за допомогою екстремальних систем автоматичного регулювання ККД електроприводу (ЕП) та ККД насоса (регулятори 2, 3). Регулювання

технологічного параметра, такого як напір чи продуктивність, здійснюється шляхом зміни частоти напруги, що живить асинхронний двигун. Регулятор технологічного параметра забезпечує необхідні статичні та динамічні характеристики контуру. Екстремальний регулятор ККД насоса виконує пошук оптимального положення засувки, при якому ККД досягає максимального значення. Збуренням для контуру екстремального регулятора служить періодична зміна режиму споживання та положення робочої точки. Регулятор сумарних втрат у двигуні екстремально визначає точку мінімальних втрат, автоматично адаптуючи напругу статора двигуна до нового навантаження. ЕМСАК працює у режимі коливань навколо заданого значення контрольованого параметра, де частота та амплітуда коливань залежать від амплітуд та періодів змін напруги і навантаження. Перехідні процеси в контурі технологічного параметра мають завершитися до періоду зміни напруги, а час пошуку екстремуму втрат у двигуні не повинен перевищувати період зміни навантаження.

В роботі [7] велика увага приділяється розробці математичної моделі насоса з екстремальним регулятором ККД та ЕМСАК насосної установки. Структурна схема екстремальної енергозберігаючої системи, представленої в [7], показана на рис. 1.2. Ця система дозволяє підтримувати ККД насосної установки на максимальному рівні. Зокрема, робота вказує на можливість побудови екстремальних енергозберігаючих ЕМСАК для насосних установок, яка забезпечує автоматичний пошук робочої точки з максимальним ККД насоса та мінімальними втратами в асинхронному електроприводі, при умові стабілізації напору (продуктивності) та розташуванні вихідної робочої точки праворуч (ліворуч) від прямої максимального ККД. Зазначається, що додаткова економія енергії за рахунок екстремального керування залежить від положення вихідної робочої точки відносно прямої максимального ККД і може становити більше 10% загальних витрат енергії.

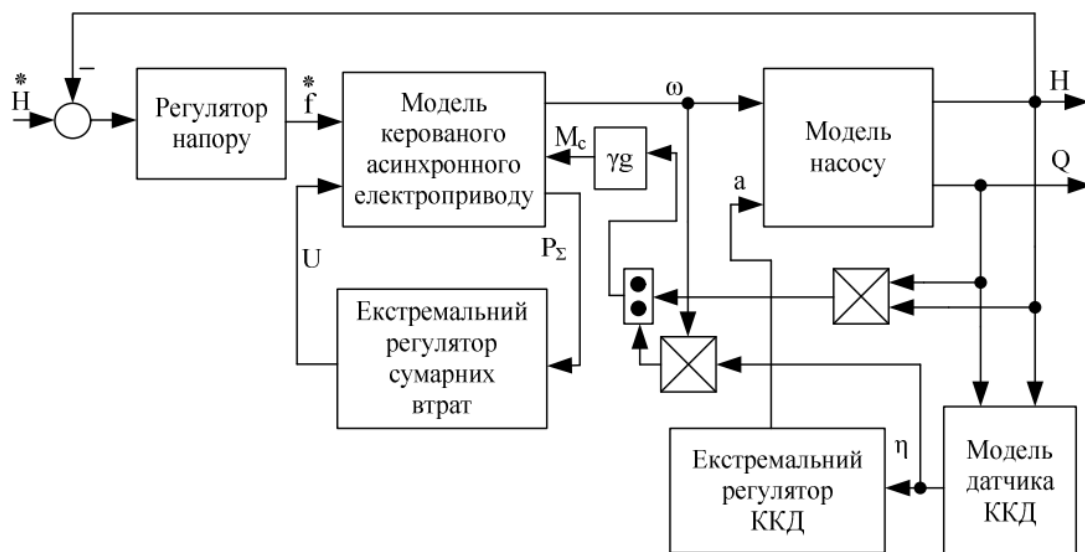


Рисунок 1.2 - Структурна схема екстремальної енергозберігаючої системи.

Ураховуючи велику потужність насосних установок, які часто досягають декількох МВт, термін окупності витрат на технічну розробку та впровадження екстремальних регуляторів згідно з [7] не перевищує одного року. Важливо зауважити, що розглянутий метод енергозбереження не може досягти аналогічного результату при роботі насосної установки в групі насосів, які працюють паралельно. Це пов'язано з тим, що тиск, що надходить до датчика ККД, залежить від продуктивності всіх насосів.

В літературних джерелах досліджується підвищення енергоефективності систем міського водопостачання за допомогою вдосконалення методів управління насосними станціями з використанням електронних обчислювальних машин (ЕОМ). У умовах стохастичного середовища, характерного для міського водопостачання, завдання енергоефективного управління водопостачанням вирішується через планування режиму роботи насосних станцій і його подальшу стабілізацію. Розроблено основні принципи управління системою міського водопостачання, які дозволяють оптимізувати її енерговитрати.

Сформульовано умови оптимального розподілу навантаження між насосними станціями і цільовою функцією планування режиму роботи насосних станцій, що дозволяє обирати насосні агрегати (дискретне управління), які здатні з мінімальними енерговитратами виконати технологічне завдання з тиску і подачі на виході насосної станції. Область допустимих управлінь насосною станцією сформульована у вигляді обмежень. На цій основі розроблено алгоритм планування оптимального режиму роботи насосної станції, що дозволяє без гідравлічного розрахунку водопровідної мережі з прийнятною для практики точністю оптимізувати склад працюючих насосних агрегатів за критерієм мінімізації витрат електроенергії. Розглянуто порядок розрахунку і сформульовані загальні рекомендації з настройки параметрів ПІ-регулятора тиску у диктуючій точці водопровідної мережі.

Вищевказані обмеження щодо підвищення ефективності роботи насосної станції включають у себе те, що завдання планування оптимального режиму роботи станції не може бути вирішене без проведення гідравлічного розрахунку водопровідної мережі. Крім того, ці обмеження не враховують взаємний вплив працюючих агрегатів, які працюють у сумісності.

Проблема підвищення точності і надійності управління режимом роботи асинхронних двигунів магістральних насосів розглядається у [8]. У роботі пропонується метод зниження загальних витрат на встановлене обладнання та електроенергію для технологічного процесу. Це досягається шляхом керування електродвигунами, при якому контролюється потужність активних агрегатів та порівнюється з заданою величиною. У випадку виникнення різниці між контрольованою та заданою потужностями, кількість включених частотно-керованих електричних приводів магістральних насосів змінюється таким чином, щоб зменшити цю різницю. Серед обмежень вказаного методу можна визначити наступне:

- По-перше, для впровадження конкретного закону управління насосною агрегатом станції необхідно моніторити тиск або продуктивність на

його виході, тоді як у запропонованому методі контролюється добуток тиску на подачу.

- По-друге, не завжди можна гарантувати точне значення потрібної продуктивності насосної станції.

Важливим завданням для фахівців, що відповідають за ефективну роботу насосного агрегата, є вибір пристрою для регулювання його продуктивності. Найоптимальнішим з погляду зекономленої електроенергії при досягненні необхідного рівня продуктивності є перетворювач частоти живлення двигуна.

Існують різні системи управління частотою електроприводу. Серед них варто виділити розімкнені системи управління частотою як найбільш прості для реалізації. На рис. 1.3 зображена функціональна схема системи управління частотою (СУЧ), яка втілює закон керування $U_1/f_1^2 = \text{const}$, що використовується для приводу турбомеханізмів.

Стабілізація співвідношення U_1/f_1^2 досягається тим, що канал регулювання амплітуди напруги (управління випрямлячем КВ) та канал регулювання частоти (автономний інвертор АІ) отримують однакові завдання. Перший канал отримує аналоговий сигнал заданої напруги u_3 , а другий - серію імпульсів, де частота f_3 пропорційна заданій напрузі. Перетворення аналогового сигналу в послідовність імпульсів виконується перетворювачем "напруга-частота". Задавач інтенсивності ЗІ забезпечує поступовий запуск та гальмування.

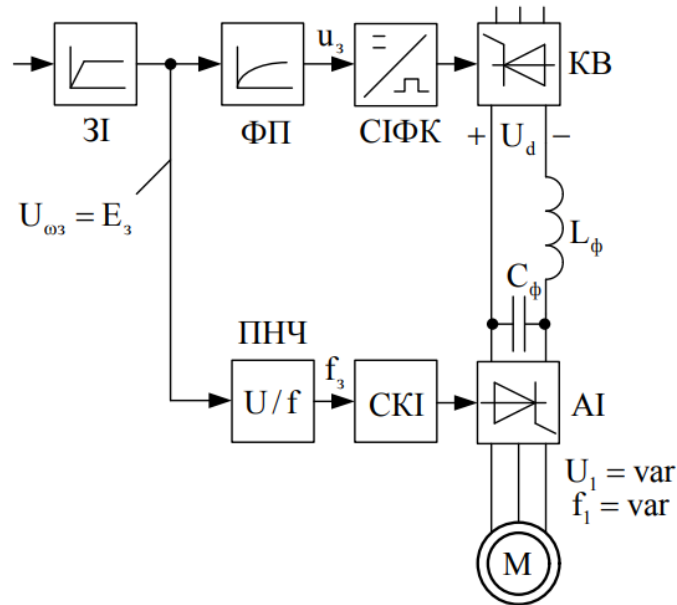


Рисунок 1.3 - Розімкнена система управління частотою з функціональним перетворювачем.

Функціональний преобразувач відтворює відповідні залежності між напругою живлення та частотою. У схожих системах закон управління частотою реалізується параметрично, без прямого контролю електрорушійної сили або потоку [13].

Коефіцієнт пропорційності між напругою та частотою (коефіцієнт передачі ПНЧ):

$$k_{Uf} = \frac{f_{1н}^2}{U_{1н}}.$$

Для зміни напрямку обертання електропривода потрібно використовувати спеціальний вузол, який, в залежності від знака напруги, що визначає швидкість, переключає послідовність ключів АІ. Можливості регулювання відкритих систем частотного керування обмежені неточністю реалізації функціонального преобразувача, а також збільшенням головного потоку при зменшенні навантаження та частоти. Тому такі системи ефективно працюють лише в обмеженому діапазоні регулювання швидкості та при майже постійному навантаженні.

Для вирішення проблеми зниження напруги у випрямлячі та підвищення точності виконання закону частотного керування, керований випрямляч (КВ) використовує негативний зворотній зв'язок (НЗ) за напругою у колі постійного струму. Система частотного керування (СЧК) із зворотнім зв'язком за напругою представляє сучасний розвиток системи, яку показано на рис. 1.3. Для обмеження струмів у таких системах може використовуватися контур випрямленого струму, який підкоряється регулятору напруги.

На сьогоднішній день існують різні засоби управління електродвигунами насосів, які враховують особливості навантаження та відповідають вимогам технічного прогресу, що стосуються автоматизації процесу керування, діагностики обладнання та надання інформації про технічний стан електродвигуна і насоса.

Відомий пристрій управління робочим режимом насосної установки містить регульований електропривід, насос, пристрій задавання, регулятор, датчик тиску і суматор. Вихід датчика тиску пов'язаний з першим входом суматора, а другий вхід суматора з'єднаний з виходом пристрою задавання. Вихід суматора підключений до входу регулятора, і вихід регулятора пов'язаний з входом регульованого електроприводу, при цьому вал останнього з'єднаний з валом робочого колеса насоса.

Обмеженням даного пристрою є використання дорогого датчика контролю, який, працюючи в агресивному середовищі, з часом втрачає точність вимірювань і вимагає частих перевірок, призводячи до додаткових витрат на ремонт та обслуговування. Крім того, системи подібного типу можуть викликати замикання не лише за тиском (напором), але й за продуктивністю (подачею) насосної установки. У такому випадку система має низькі показники надійності через використання двох датчиків цього типу.

2 СПОЖИВАННЯ ТА ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ НАСОСІВ

2.1. Споживання електроенергії основними насосними агрегатами

Прогнозування електроенергії, споживаної насосними агрегатами, включає витрати на підняття рідини та подолання гідродинамічного опору у трубопроводі. Крім того, частина енергії споживається в самому насосному агрегаті для подолання тертя в сальниках та підшипниках, нагрівання магнітопроводів та обмоток електродвигуна, вентиляції та інших процесів.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) насосного агрегату визначає, яка частина електроенергії, отриманої з електричної мережі, використовується ефективно. Для сучасних насосних агрегатів, залежно від їх потужності, призначення та інших факторів, ККД може змінюватися від 0,3 до 0,9.

Потужність, кВт, споживана насосом, визначається за формулою:

$$N = 9,81 \frac{Q \cdot H}{\eta_n} \quad (2.1)$$

де Q – подача насосу, м³/сек; H – напір насосу, м; η_n – ККД насосу.

Потужність, кВт, споживана насосним агрегатом, має визначатися за формулою:

$$P = \frac{N}{\eta_{ед} \cdot \eta_{пр}} \quad (2.2)$$

де $\eta_{ед}$ – ККД двигуна; $\eta_{пр}$ – ККД перетворювального устаткування (частотного перетворювача, трансмісії та ін.).

Потужність агрегатів на сучасних водопровідних та каналізаційних насосних станціях може коливатися в межах від 3,5 до 5 МВт.

Кількість спожитої електроенергії агрегатом протягом часу t (в годинах) при роботі з постійною подачею та незмінним тиском визначається за допомогою відповідної формули:

$$W = P \cdot t \quad (2.3).$$

У реальних насосних установках зазвичай спостерігається змінна подача та, відповідно, змінний тиск. Це призводить до зміни потужності, яку споживає агрегат протягом певного часу. Таким чином, використання формули (2.3) ефективно застосовується лише в умовах тривалої роботи насосної установки в рівномірному режимі.

Для оцінки кількості електроенергії, яку споживають насосні станції при нерівномірному режимі роботи, розглянемо спрощену методику, яка описана у [2]. Ця методика дозволяє прогнозувати витрати електроенергії насосними установками.

На рис. 2.1. наведено графік сумісної роботи насоса та трубопроводу, а також упорядковану діаграму (криву розподілу) подачі рідини. Упорядкована діаграма подачі рідини визначає криву, яка з'єднує ординати графіків подачі рідини в порядку збільшення або зменшення. Ця діаграма будується для тривалого розрахункового періоду, наприклад, за рік.

Упорядковану діаграму (повністю або частково) можна апроксимувати рівнянням прямої лінії:

$$Q = Q_B \cdot \left[(1 - \lambda) \cdot \frac{t}{T} + \lambda \right], \quad (2.4)$$

де Q_B - максимальна для даної насосної установки подача води за розрахунковий період; Q_M - мінімальна для даної насосної установки подача води за розрахунковий період; λ - відносна мінімальна подача даної установки, $\lambda = Q_M / Q_B$; T - час розрахункового періоду.

В якості розрахункового періоду використовується продовжений проміжок часу, такий як технічний рік, що дорівнює 8760 годинам. З використанням рівнянь (2.1) та (2.4) отримано залежність витрати потужності насосами від часу, яка застосовується в умовах, коли насос працює без надлишкового напору, тобто робоча точка насоса рухається вздовж характеристики трубопроводу. При виведенні цієї залежності були враховані

певні припущення, зокрема, щодо роботи насосів в межах робочої зони та невеликих змін ККД у процесі роботи.

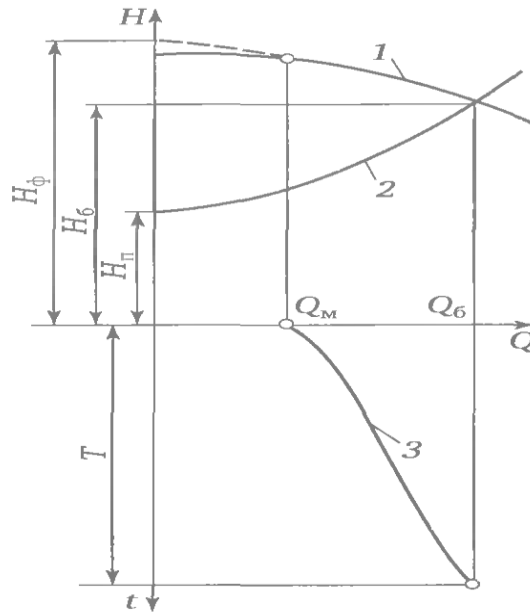


Рисунок 2.1 - Графік роботи насоса сумісно з трубопроводом та упорядкована діаграма подачі води: 1 – напірна характеристика насоса; 2 – характеристика трубопроводу; 3 – діаграма подачі води.

Після інтегрування даної залежності у межах від 0 до T та інших перетворень маємо вираз для визначення кількості енергії, споживаної за розрахунковий період часу:

$$W = \frac{N_B \cdot T \cdot (1 + \lambda)}{\eta_{ED} \cdot 4} \cdot [(1 + H_{II}^*) + \lambda^2 \cdot (1 - H_{II}^*)] \quad (2.5)$$

де N_B - потужність, споживана насосом при максимальній подачі, кВт; $H_{II}^* = H_{II}/H_6$ – протитиск у відносних одиницях. Потужність N_B обчислюється за формулою (2.1) при підставлянні значень найбільшої для даної установки подачі рідини Q_B і напору H_6 , відповідно цій подачі.

Рівняння (2.5) дозволяє визначити енергоспоживання насосною установкою протягом розрахункового періоду T при умові, що її агрегати працюють без перевищення напору. Похибка розрахунків становить приблизно від 10% до 15%.

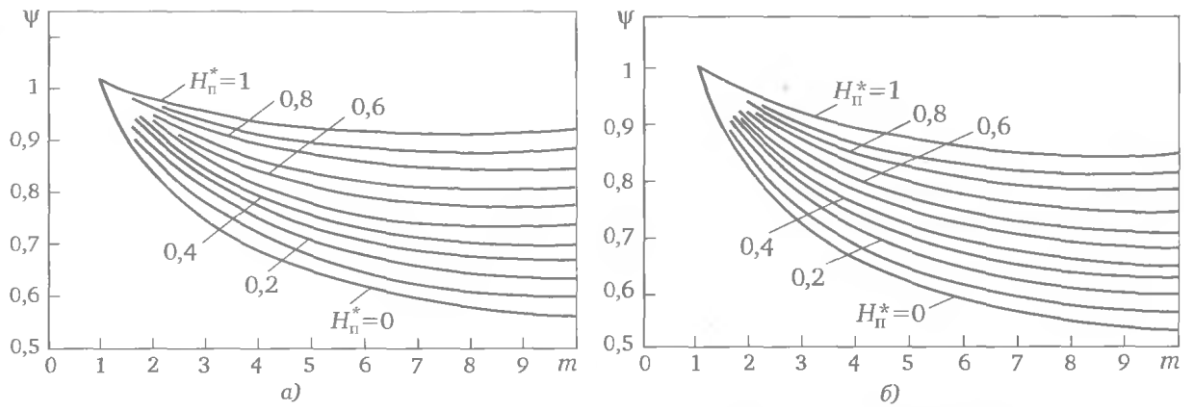


Рисунок 2.2 - Залежність понижуючого коефіцієнту ψ від числа працюючих насосних агрегатів та відносного статичного напору: а – при $H_{\phi}^* = 1,45$; б - $H_{\phi}^* = 1,25$

Якщо виразити залежність $H = f(Q)$ у вигляді рівняння характеристики насоса, а не трубопроводу, можна отримати вираз для розрахунку споживання електроенергії насосним агрегатом при роботі з перевищенням напору.

$$W = \frac{N_B \cdot T \cdot (1 + \lambda)}{\eta_{ED} \cdot 4} \cdot [(1 + H_{\phi}^*) + \lambda^2 \cdot (1 - H_{\phi}^*)] \quad (2.6)$$

де $H_{\phi}^* = H_{\phi}/H_6$ – відносний фіктивний напір насосної установки при нульовій подачі.

Рівняння (2.6) розглядається для установки з одним працюючим насосним агрегатом. У випадку одночасної роботи декількох насосів середній напір, що розвивається ними, може бути дещо нижчим, ніж напір, який розвивається при тих самих умовах одним насосом. Це пояснюється тим, що при суттєвому зниженні подачі води кількість працюючих насосів може зменшитися, що призводить до зниження надлишкового напору. З цієї причини у рівнянні (2.6) вводиться знижуючий коефіцієнт ψ , значення якого залежить від кількості працюючих насосних агрегатів і відносного статичного напору H_{Π}^* .

Кількість електроенергії, розрахована за виразом (2.5), відповідає оптимальному режиму роботи насосної установки, при якому немає

перевищення напорів і досягаються максимальні значення ККД. Однак у реальних умовах роботи відхилення від оптимальних режимів є загальним явищем. Основна різниця полягає в тому, що напір, який виникає внаслідок роботи насосних установок, часто перевищує значення, визначене рівнянням (2.4). Таким чином, реальне споживання електроенергії у більшості випадків перевищує обсяг, що розраховується за формулою (2.5) [2].

Звичайно, планування енергоспоживання насосних установок базується на середніх статистичних нормах, які вище науково обґрунтованих. У середньому, питома витрата енергії на переміщення 1000 м³ води становить 500-550 кВт·год [2]. Ця норма включає в себе повний цикл переміщення води, включаючи подачу води насосними станціями I підйому до очисних споруд, подачу води від станцій II підйому до споживача, та перекачування стічних вод каналізаційними станціями до очисних споруд каналізації. Для окремих насосних установок, питома витрата на 1000 м³ знаходиться в межах 100-200 кВт·год.

В залежності від місцевих умов, норма енергоспоживання для кожної насосної установки значно відрізняється від середнього значення, основним чином через різницю в висоті підняття рідини. Тому, в деяких господарствах, питомі норми витрати електроенергії плануються не лише на одиницю об'єму поданої рідини, але і як добуток маси поданої рідини і напору, що розвивається насосами. Ця норма споживання енергії зазвичай знаходиться в межах (3,3 – 4,0) кВт·год/(т·м). Розкид цих значень для різних насосних установок пов'язаний зі станом насосних агрегатів, а також гідравлічним опором всасуючих та напірних трубопроводів і арматури насосних установок.

З енергетичної точки зору, використання норм енергоспоживання в одиницях кВт·год/м³ є більш обґрунтованим, ніж кВт·год/(т·м). Це пояснюється тим, що у другому випадку норма енергоспоживання є оберненою до ККД насосу, і тому об'єктивно характеризує лише стан

насосного агрегату, не враховуючи економічність роботи системи водопостачання в цілому.

Для оптимізації економії енергії в системі водопостачання важливо прагнути до зниження напору в системі. Тому, питома норма витрати енергії повинна стимулювати впровадження заходів, таких як регулювання кутової швидкості насосів в залежності від зміни режиму водоспоживання чи притоку стічних вод, очищення внутрішніх поверхонь труб, а також застосування спеціальних покриттів для внутрішніх поверхонь труб і подібні заходи.

Отже, для оцінки загального стану системи водопостачання доцільно використовувати норму енергоспоживання, виражену у кВт·год/м³. З іншого боку, для оцінки стану насосних агрегатів є доцільним використовувати норму в кВт·год/(т·м). Такий підхід дозволяє ефективно оцінювати якість роботи системи в цілому та стан окремих компонентів.

Облік електроенергії в насосних станціях важливий для ефективного управління та економії ресурсів. Для точного вимірювання споживаної електроенергії використовують лічильники активної та реактивної електроенергії, які встановлюються на кожному насосному агрегаті. Фактична електроспоживана енергія на насосній станції визначається як різниця показань лічильників на живлячих лініях та лічильників власних потреб станції (освітлення, опалення, вентиляція тощо).

Вимірювання електроенергії лічильниками є найбільш достовірним методом отримання інформації про фактичне споживання електроенергії на реальних об'єктах. Використання прямих даних, таких як струм, робочий час та потужність електродвигунів, для цих цілей неприпустиме.

При проектуванні насосних станцій для прогнозування електроспоживання застосовують розрахункові методи. Ці методи дозволяють порівнювати фактичні витрати електроенергії з обґрунтованими споживаннями, виявляючи можливості для економії енергії. Для точного

визначення фактичних витрат електроенергії на перекачку рідини рекомендується встановлення витратомірів на насосній станції, що дозволить ефективно управляти енергетичними режимами роботи насосних установок.

Для вимірювання витрат рідини використовують індукційні та ультразвукові витратоміри, причому останні найбільш поширені в сучасний період. Важливо відзначити, що обидва типи витратомірів потребують наявності прямих ділянок трубопроводів для їх встановлення.

Необхідною складовою витратомірів є лічильні інтегруючі приставки. Наявність таких приставок разом із лічильниками електроенергії дозволяє досить точно визначити фактичні питомі витрати електроенергії, виражені у кількості кіловат-годин на кубометр рідини (кВт·год/м³), витраченої на її подачу:

$$W_{\text{yd}} = \frac{W}{Q} \quad (2.7)$$

де W – витрата електроенергії за поточний період T_p , кВт·год; Q – подача рідини за період часу T_p , м³.

Для забезпечення більшої об'єктивності розрахунків, рекомендується використовувати достатньо обґрунтовані розрахункові періоди T_p . Наприклад, для систем водоподачі та водовідведення оптимальним періодом може бути тиждень, оскільки за цей час відбуваються найбільш характерні зміни в режимі роботи насосних установок.

Оцінка ефективності заходів з економії електроенергії може бути здійснена, враховуючи фактичну питому витрату електроенергії. Для цього слід визначити питому витрату електроенергії, розраховану на основі вимірів до впровадження заходу W_{yd1} , і порівняти її з питомою витратою після впровадження заходу W_{yd2} .

Фактична економія електроенергії за рік обчислюється за формулою:

$$W_{\text{ек}} = (W_{\text{yd1}} - W_{\text{yd2}}) \cdot Q_{\text{рік}} \quad (2.8)$$

де Q – об'єм перекачки за рік.

Доцільно коректуючи виміри та розрахунки повторювати 3 – 4 рази на рік, щоб врахувати сезонні зміни в режимах роботи насосних установок.

2.2. Баланс енергоспоживання.

Під час аналізу режиму використання енергії насосних станцій встановлено, що від 75% до 95% загальної споживаної електроенергії припадає на основні насосні агрегати, які відповідають за переміщення рідини. Цей відсоток зростає зі збільшенням розміру насосної установки.

У насосних установках, де агрегати мають потужність від 800 до 1000 кВт, понад 90-95% загальної споживаної електроенергії використовується основними агрегатами. У невеликих насосних установках, особливо тих, де електроенергія використовується для опалення приміщень насосної станції та інших потреб, частка електроенергії, яку витрачають основні агрегати, знижується до 75% від загального споживання станції, а в деяких випадках (у дрібних насосних установках) і до 50%.

Від 5% до 10% загальної електроенергії використовується для опалення приміщень насосних станцій. Допоміжні системи та механізми насосних станцій споживають 2-3% загальної електроенергії. Системи вентиляції та освітлення, як правило, використовують 1-2% загальної енергії. Крім того, частина споживаної електроенергії витрачається на живлення пристроїв сигналізації, контролю, оперативних пристроїв (вимикачів, реле та інших) і пристроїв автоматизації. Ці дані представлені на діаграмі, яку можна знайти на рисунку 2.3.

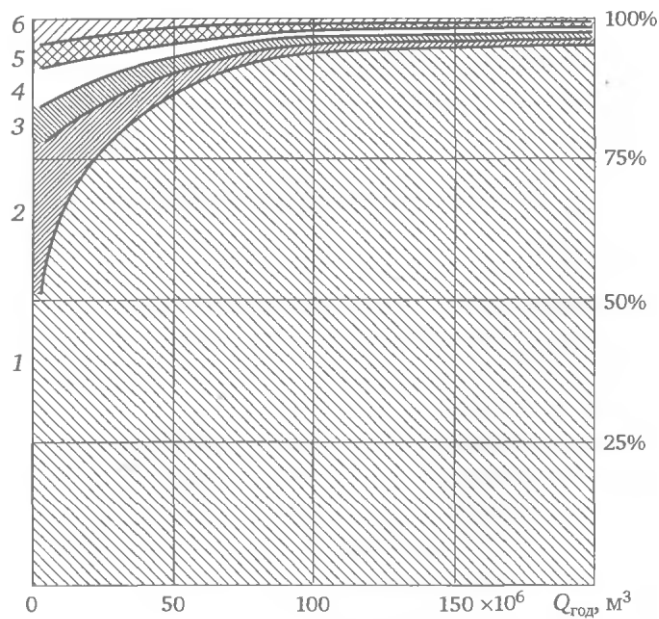


Рисунок 2.3 - Діаграма енергоспоживання насосних станцій залежно від подачі : 1 – перекачка води; 2 – опалення; 3 – додаткові механізми та системи; 4 – вентиляція; 5 – електричне освітлення; 6 – оперативні кола.

У деяких випадках електроенергія, що споживається насосними станціями, розподіляється між субабонентами, які не є безпосередніми споживачами станцій. При складанні енергетичного балансу станції обов'язково потрібно враховувати цих субабонентів.

Аналізуючи баланс енергоспоживання, видно, що основні насосні агрегати, відповідальні за перекачку рідини, є найбільш енергоємними споживачами. Споживання електроенергії цими основними насосними агрегатами в значній мірі залежить від технологічних процесів транспортування води. Для забезпечення економічної ефективності роботи насосної установки необхідно перш за все забезпечити економічну ефективність основних насосних агрегатів. Важливо також приділяти увагу допоміжним системам і механізмам, а також системам вентиляції, опалення і освітлення. Проте в контексті пріоритетів важливо розглядати режими роботи основних агрегатів.

2.3. Втрати енергії в насосних установках, пов'язані з нерациональним підвищенням напору.

Робота насосних установок із підвищеним напором обумовлена кількома факторами, такими як збільшення гідравлічного опору у системі трубопроводів, коливання рівня рідини в приймальних та напірних резервуарах, а також невідповідність режиму роботи насосів режиму притоку або споживання рідини.

Збільшення напору через зростання гідравлічного опору є результатом витрати рідини та впливає на динамічну складову напору, що генерується насосною установкою. Це може змінювати крутизну характеристики трубопроводу.

Зміни напору, спричинені коливаннями рівня рідини, не залежать від витрати рідини та впливають лише на значення статичної складової напору $H_{ст}$, який розвивається насосною установкою. В результаті цього може змінюватися положення характеристики $Q-H$ в координатах Q та H . Величина статичної складової зростає при підвищенні рівня та зменшується при зниженні.

Однією з поширених причин збільшення гідравлічного опору труб є їхній внутрішній корозійний процес, що призводить до зниження пропускної здатності трубопроводів. Це може вимагати підвищення напору, створеного насосною станцією, для забезпечення необхідного обсягу рідини при зростанні гідравлічного опору.

Додатковий гідравлічний опір може виникати з різних причин, таких як низька якість труб та недбалий монтаж трубопроводів. Труби, виготовлені з великими відхиленнями від установлених розмірів і геометричної форми, при з'єднанні між собою можуть створювати виступи, які збільшують гідравлічний опір трубопроводів. Такий самий негативний ефект можуть створювати зварні шви, які виконані з низькою якістю.

Джерелом додаткового гідравлічного опору є також низький рівень експлуатації обладнання насосних станцій і систем трубопроводів. Неповне відкриття засувки та затворів через неувважність обслуговуючого персоналу може призводити до того, що окремі ділянки трубопроводів залишаються виведеними з роботи, що також впливає на підвищення напору в системі транспортування рідини і вимагає додаткових витрат електроенергії.

Навіть при ідеальному стані труб і трубопровідної арматури може спостерігатися нераціональне перевищення напору, яке обумовлене невідповідністю режиму притоку або споживання рідини режиму роботи насосів. Невідповідність режимів роботи насосів режиму роботи системи подачі і розподілення води може призводити до перевищення динамічної або статичної складової напору, або обох складових одночасно.

Розглянемо ситуацію, коли насосна установка працює з перевищенням динамічної складової напору. Динамічна складова напору, яку створює насосна установка, залежить від витрати рідини.

$$h_{\text{дин}} = SQ^p \quad (2.9)$$

де p – коефіцієнт, який залежить від матеріалу труб, якості монтажу трубопроводу та періоду його служби, $p=1,8-2,0$.

Під час роботи насосної установки з подачею, що меншою, ніж розрахункова, виникає розбіжність між напором, який створюється насосною установкою, і напором, необхідним для подачі певної кількості рідини. Порівняння характеристик відцентрових насосів та трубопроводів вказує на те, що при зменшенні обсягу подачі води потрібний напір також зменшується, тоді як напір, який виробляється насосом, збільшується.

Різниця між цими значеннями і є перевищенням напору понад потрібне значення:

$$\Delta H = H_n - H_c \quad (2.10)$$

графіків спільної роботи насосу та трубопроводу видно, що розбіжність ΔH зростає з крутішою характеристикою як насосу, так і

трубопроводу. Також спостерігається, що це перевищення напору збільшується зі зменшенням фактичної подачі насосу в порівнянні з розрахунковою. Залежність цього перевищення напору від витрати Q та параметрів H_ϕ і $H_{ст}$, які визначають крутизну характеристик насосу та трубопроводу відповідно:

$$\Delta H = \Delta H_\phi [1 - (Q_m/Q_\phi)^2] \quad (2.11)$$

$$\text{де } \Delta H_\phi = H_\phi - H_{ст}.$$

Напір ΔH_ϕ витрачається на різноманітних елементах системи, таких як затвори, засувки, дроселюючі напірні комунікації, водорозбірні крани та інша арматура, через яку споживач отримує рідину з системи. Це перевищення напору призводить до нераціонального споживання додаткової потужності, вимірюваної в кВт:

$$\Delta N = 9.81 \frac{Q \Delta H}{\eta_n} \quad (2.12)$$

Якщо насос працює протягом часу t із перевищенням напору ΔH , то кількість витраченої електроенергії, кВт·год, буде дорівнювати:

$$\Delta W = \Delta N t$$

Протягом розрахункового періоду подача рідини і, відповідно, перевищення напору постійно змінюються. У цей час енергоспоживання, яке визначається за розрахунковий період, представляє собою суму електроенергії, яка витрачається протягом різних часових інтервалів роботи установки:

$$\Delta W = 9.81 \frac{\sum Q_i \Delta H_i t_i}{\eta_n} \quad (2.13)$$

де Q_i , ΔH_i – подача та перевищення напору за період часу t_i .

Вираз (2.3) зручно використовувати у випадках, коли установка працює в рівномірному режимі протягом значних проміжків часу. Однак у випадках змінного режиму роботи стає важко визначити, скільки часу установка працює при певній подачі, і яке перевищення напору відповідає цій подачі. Змінний режим роботи є характерним для багатьох насосних установок,

зокрема тих, що працюють в системах водоподачі та водовідведення. Рівняння, що визначає споживання електроенергії на нераціональне перевищення напору протягом часу t , може бути виражене таким чином:

$$\Delta W_{\Sigma} = N_6 T \left\{ \frac{1}{4} H_{\Pi}^* \left(\frac{H_{\Phi}^*}{H_{\Pi}^*} - 1 \right) (1 - \lambda)(1 + \lambda)^2 \right\} \quad (2.14)$$

Розглянемо функціонування насосної установки, де відбувається перевищення статичної складової напору. У багатьох таких установках спостерігається зміна статичної складової напору через коливання рівня рідини у приймальному або напірному резервуарі, а також внаслідок коливань рівня води в водоймі, з якої насосна станція забирає воду. Ці установки зазвичай працюють у циклічному режимі. При наповненні резервуарів насоси увімкнені, а при їх спустошенні вимикаються. Схема такого обладнання показана на рисунку 2.4, а графік спільної роботи насосу, трубопроводу та резервуару – на рисунку 2.5.

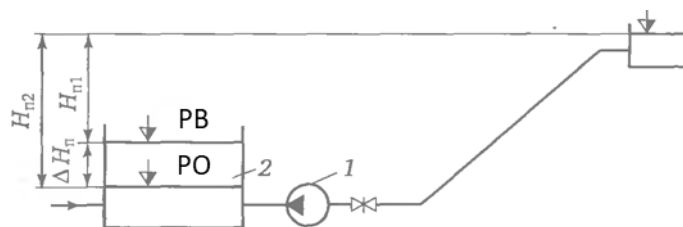


Рисунок 2.4 - Схема насосної установки при змінному статичному напорі: PB – рівень включення; PO – рівень відключення; 1 – насос; 2 – приймальний резервуар.

У циклічному режимі роботи, як показано на рисунку 2.5, коли насос увімкнений, статичний напір становить H_{n1} , і при відключенні цей показник змінюється на H_{n2} . Зміна статичного напору визначається різницею в рівнях включення та відключення насосу.

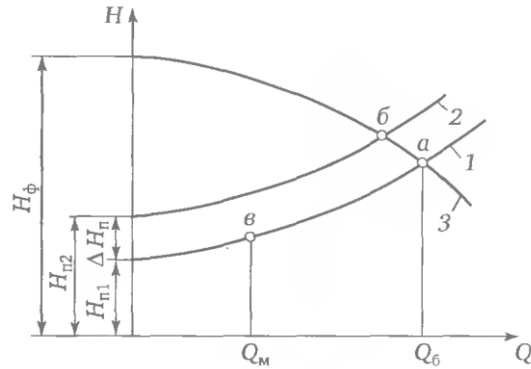


Рисунок 2.5 - Графік роботи насосу сумісно з трубопроводом і резервуарами зі змінним статичним напором: 1 – характеристика трубопроводу нижнього рівня; 2 – характеристика трубопроводу верхнього рівня; 3 – характеристика насосу.

Аналіз режимів роботи діючих насосних установок різного призначення свідчить, що в залежності від місцевих умов електроенергія, витрачена на транспортування рідини, витрачається на перевищення динамічної складової напору від 15% до 25%. На перевищення статичної складової напору спостерігається витрата електроенергії в межах від 5% до 10%, і в окремих випадках до 20%.

З урахуванням цих аспектів можна зробити висновок, що для зменшення втрат електроенергії в насосних установках, викликаних перевищенням напору, необхідно налаштувати режим роботи таким чином, щоб робоча точка насоса зміщувалася по характеристиці трубопроводу, а рівень в приймальному резервуарі стабілізувався на верхньому допустимому рівні.

2.4. Втрати електроенергії при роботі насосів в режимах відхилення від номінального.

Реальний режим функціонування насосних установок може значно відрізнятися від того, що було розраховано. Це пояснюється постійною

зміною умов експлуатації, відсутністю точних вихідних даних при проектуванні, обмеженою номенклатурою насосів і іншими факторами.

Проаналізуємо режим роботи насосу, коли його подача менша, ніж розрахункова, а напір вище розрахункового. Графік спільної роботи насосної установки та трубопроводу (рис.2.5) відображає цей режим. Згідно з графіком, більшу частину часу установка працює з напором, який значно перевищує необхідний для подачі визначеної кількості рідини (точка б). Цей режим викликає підвищення напору, збільшення витрат та непродуктивних витрат води, і, в результаті, значну перевитрату електроенергії. У цьому випадку ККД насоса нижчий, ніж його номінальне значення.

Розглянемо випадок, де насос подає більше, ніж було розраховано, і напір нижчий, ніж розрахунковий. Відповідно до цього сценарію, робоча точка буде в (рис. 2.6). У цьому випадку насос також працює з ККД, який нижчий, ніж його номінальне значення.

Фактична робота насоса з ККД, що відрізняється від номінального, призводить до збільшення споживаної потужності і, відповідно, до зростання витрат електроенергії на транспортування рідини.

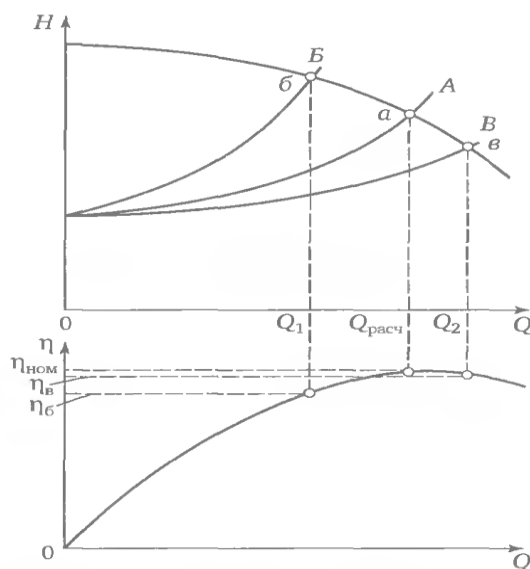


Рисунок 2.6 - Умови роботи насоса при різних ККД: А - Розрахункова характеристика трубопроводу; Б - Характеристика трубопроводу з підвищеним гідравлічним опором; В - Та ж сама характеристика трубопроводу, але зі зниженим гідравлічним опором.

Треба відзначити, що електродвигун для приводу насосу зазвичай підбирається так, щоб номінальні характеристики насоса відповідали номінальним параметрам двигуна. Отже, при роботі насоса в режимі, відмінному від номінального, також використовується двигун не в номінальному режимі. Це призводить до додаткових втрат в електродвигуні та елементах системи електропостачання.

Кількість енергії, яку витрачається внаслідок роботи насосних агрегатів з $\eta_{\text{факт}}$, відмінним від значення $\eta_{\text{ном}}$ визначають за допомогою формули:

$$\Delta W = \frac{\gamma Q H}{102 \eta_{\text{ном}}} t \left(\frac{\eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{факт}}} - 1 \right)$$

З РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЯК ОСНОВА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

Найбільш ефективним способом регулювання режимів роботи відцентрових насосів є зміна частоти обертання їх робочих коліс. Зміну цієї частоти можна досягти, використовуючи газові турбіни, двигуни внутрішнього згоряння або регульовані електроприводи в якості приводних двигунів. Газові турбіни та двигуни внутрішнього згоряння мають властивості, які дозволяють їм змінювати частоту обертання у потрібному діапазоні. Проте для систем автоматичного управління роботою насосних установок зазвичай використовують різні види регульованих електроприводів.

Регульований електропривід поділяється на дві основні групи: постійного та змінного струму.

Аналіз процесу регулювання частоти обертання будь-якого механізму можна провести, використовуючи механічні характеристики агрегату. У цьому випадку розглядаються характеристики електродвигунів, які порівнюються з механічними характеристиками насосів. Ці характеристики можна розділити на три основні типи: абсолютно жорсткі (крива 1 на рис. 3.1) - характерні для синхронних електродвигунів, які живляться безпосередньо від мережі, при цьому частота обертання залишається сталим при зміні обертаючого моменту; жорсткі (крива 2 на рис. 3.1) - характерні для асинхронних електродвигунів (в робочій частині характеристики) і електродвигунів постійного струму з паралельним збудженням, де частота обертання незначно змінюється при зміні обертаючого моменту; м'які (крива 3 на рис. 3.1) - характерні для електродвигунів постійного струму з

послідовним збудженням, де частота обертання суттєво змінюється зі зміною обертаючого моменту.

Також можна виокремити інші види механічних характеристик. Наприклад, механічні характеристики електродвигунів постійного струму зі змішаним збудженням знаходяться у проміжному положенні між характеристиками електродвигунів з паралельним і послідовним збудженням. Механічні характеристики асинхронного електродвигуна з резистором, введеним в роторний ланцюг, менш жорсткі, чим характеристики короткозамкнутого двигуна.

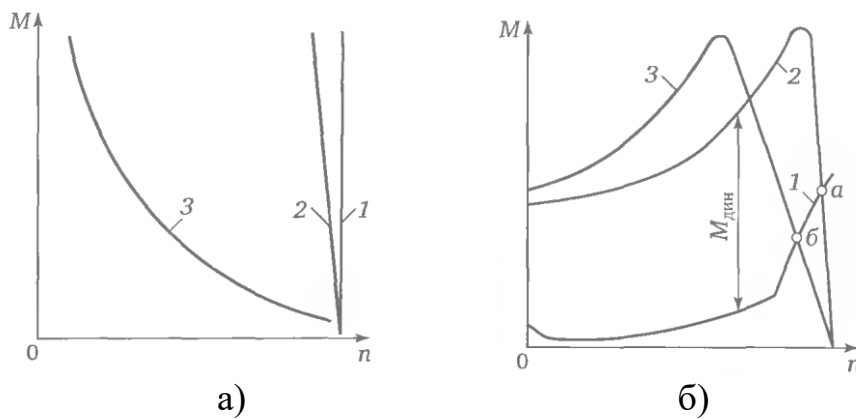


Рисунок 3.1 - Механічні характеристики електродвигунів (а) та насосу (б).

Характеристики регульованих електродвигунів суттєво відрізняються від характеристик нерегульованих. У процесі регулювання вони можуть змінювати своє положення, форму або обидві ці характеристики одночасно.

Насосному агрегату, що складається з насоса та електродвигуна, приписують механічну характеристику, яка вказує на залежність його моменту опору від частоти обертання. На малюнку 3.1 (б) представлені характеристики відцентрового насоса зі зворотнім затвором (крива 1) та електродвигуна з короткозамкнутим ротором (крива 2). Різниця між обертаючим моментом електродвигуна і моментом опору насоса отримує назву динамічного моменту. Якщо обертаючий момент двигуна перевищує момент опору насоса, то динамічний момент вважається позитивним, у

випадку менших значень – від'ємним. Під впливом позитивного динамічного моменту насосний агрегат розпочинає рухатися зі збільшеною швидкістю, тоді як від'ємний момент призводить до його гальмування. У випадку, коли обертаючі моменти рівні, насосний агрегат працює з постійною частотою обертання, встановлюючи усталений режим роботи. Ці значення частоти обертання та відповідного моменту визначаються там, де механічні характеристики електродвигуна та насосу перетинаються, зокрема в точці "а" на рисунку 3.1 (б).

Якщо в процесі регулювання, наприклад, внесенням додаткових опорів в роторний ланцюг двигуна для зроблення механічної характеристики більш "м'якою" (крива 3 на рис. 3.1 (б)), момент обертання електродвигуна стане меншим за момент опору. За дії від'ємного механічного моменту насосний агрегат розпочне гальмування, доки обертаючий момент і момент опору не зрівноважаться (точка "б" на рисунку 3.1 (б)). Цій точці відповідає своя частота обертання та відповідне значення моменту. Отже, процес регулювання частоти обертання насосного агрегату безперервно включає зміни в обертаючому моменті електродвигуна та моменті опору насосу.

Існують основні види регульованого електроприводу, які використовуються в насосних установках. Регулювання частоти обертання насосу може відбуватися шляхом зміни частоти обертання електродвигуна або зміною передаточного відношення трансмісії, яка з'єднує насос із електродвигуном, який працює з постійною швидкістю.

3.1. Регулювання частоти обертання електродвигунів

Частотний метод регулювання швидкості асинхронних двигунів вважається найбільш економічним порівняно з іншими відомими методами. Перетворювачі частоти, призначені для частотно-регульованих асинхронних електроприводів, можуть бути безпосередніми частотними перетворювачами

або дволанковими перетворювачами частоти (ДПЧ) з проміжною ланкою постійного або змінного струму.

В сучасних частотно-регульованих асинхронних електроприводах широко використовуються ДПЧ з проміжною ланкою постійного струму. Основними компонентами таких перетворювачів є випрямляч, фільтр проміжної ланки постійного струму та автономний інвертор.

Залежно від типу інвертора, який використовує комутатор на напівпровідникових силових ключах, дволанкові перетворювачі частоти поділяються на два основних класи: перетворювачі з автономним інвертором напруги (АІН) і з автономним інвертором струму (АІС).

У перетворювача з АІН обмін енергією між мережею і двигуном обмежений через використання некеруємого випрямляча. При генераторному гальмуванні енергія, яку віддає двигун, розсіюється в елементах інвертора та резисторі гальмівного пристрою, що підключений до шин постійного струму через керуючий напівпровідниковий ключ. У випадках, коли обмін енергією між мережею та двигуном є важливим для режимів електропривода, дволанкові перетворювачі частоти з АІН включають активний випрямляч напруги замість некеруємого випрямляча.

З використанням активного випрямляча напруги можливо забезпечити не лише відновлювальне гальмування асинхронного двигуна, але також реалізацію перетворювача частоти з зазначеним значенням коефіцієнта потужності, наприклад, рівного одиниці. У найближчому майбутньому регульовані асинхронні електроприводи можуть використовувати перетворювачі частоти з прямим зв'язком на повністю керованих напівпровідникових пристроях.

Використання дволанкових перетворювачів частоти з активними випрямлячами і перетворювачів частоти з прямим зв'язком на керованих напівпровідникових пристроях дозволяє ефективно розв'язувати завдання з енергозбереження в системі автоматизованого електропривода, виконуючи

свою основну функцію управління рухом робочих органів технологічних машин і пристроїв на високому якісному рівні.

Щоб гарантувати стійкість роботи електродвигуна та уникнути його перевантаження за струмом та магнітним потоком, а також для забезпечення високих енергетичних показників у частотному перетворювачі, необхідно підтримувати конкретне співвідношення між його вхідними та вихідними параметрами. Це співвідношення визначається згідно з рівнянням закону частотного регулювання Костенко [11]:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}. \quad (3.1)$$

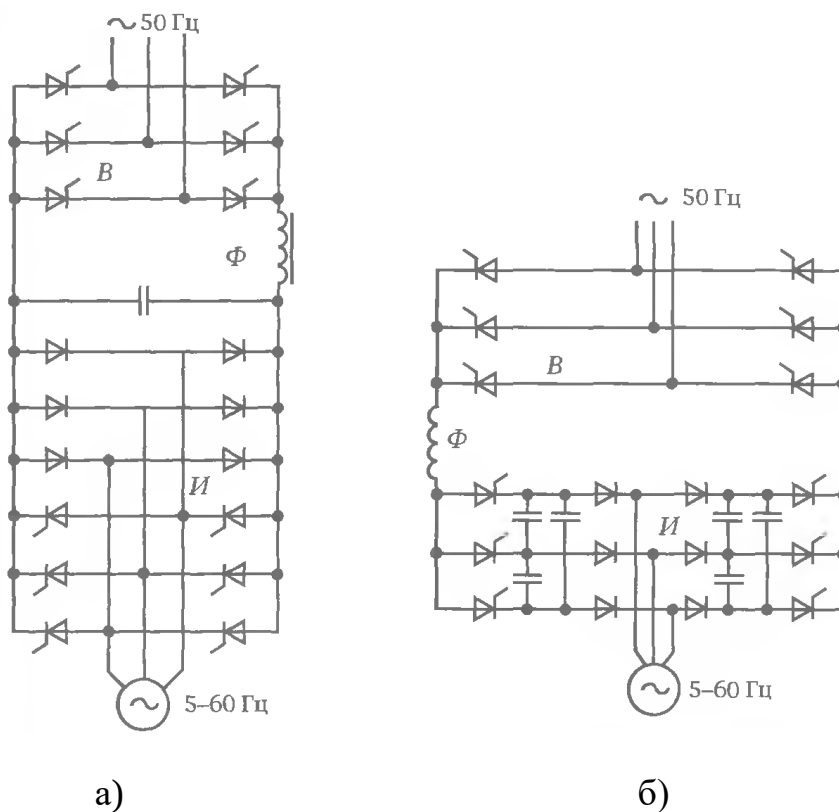


Рисунок 3.1 - Схема частотного електроприводу: а) – з інвертором напруги; 2 – з інвертором струму.

У випадку насосів, які функціонують без статичного напору, механічна характеристика може бути визначена рівнянням квадратичної параболи, де повинне бути задоволено співвідношення:

$$U_1/f_1^2 = U_2/f_2^2 = \text{const.} \quad (3.2)$$

У випадку насосів, які працюють із статичним напором, співвідношення стає більш складним:

$$U_1/f_1^{1+k/2} = U_2/f_2^{1+k/2}, \quad (3.3)$$

де k – показник ступеню для рівнянні механічної характеристики насосу.

На практиці в насосних установках частіше використовують перетворювачі загального призначення, які забезпечують такі співвідношення:

$$U_1/f_1 = U_2/f_2 = \text{const.} \quad (3.4)$$

На рисунку 3.2 представлені механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні відповідно до виконання співвідношення (3.4). При зменшенні частоти f_2 , механічна характеристика не лише переміщається в координатах n - M , але також зазнає певних змін у своєму формі. Зокрема, спостерігається зменшення максимального моменту електродвигуна. Це пояснюється тим, що при виконанні співвідношення (3.4) і зміні частоти f_1 не враховується вплив активного опору статора на величину обертаючого моменту двигуна. При частотному регулюванні з врахуванням цього впливу максимальний момент електродвигуна залишається незмінним, і форма механічної характеристики зберігається, змінюється лише її положення.

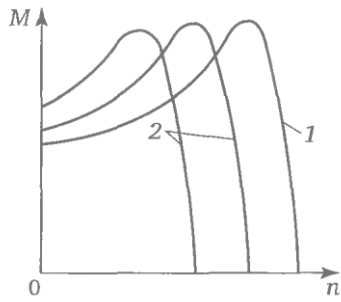


Рисунок 3.2 - Механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні при максимальній (1) і знижених (2) частотах.

У частотних перетворювачах, що базуються на АІН (рис. 3.1 а), напруга в ланцюзі постійного струму випрямляється. Згладжуючий фільтр у цих перетворювачах складається з реактору, який послідовно підключається до інвертора, і конденсатора, що паралельно підключається до АІН. На виході перетворювача форма кривої вихідної напруги (зазвичай прямокутна) визначається послідовністю включення тиристорів, а форма кривої струму відповідає характеру навантаження.

У частотних перетворювачах, які ґрунтуються на АІС (рис. 3.1 б), струм в ланцюзі постійного струму випрямляється. Згладжуючий фільтр формується реактором, який послідовно включається з інвертором. Форма кривої вихідного струму на виході перетворювача визначається чергою переключення тиристорів, а форма кривої вихідної напруги залежить від характеру навантаження.

Перетворювачі частоти, що базуються на АІН з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), володіють покращеними енергетичними характеристиками завдяки тому, що на виході перетворювача забезпечується форма кривих струму та напруги, наближена до синусоїдальної. В цих перетворювачах можуть застосовуватися некеровані випрямлячі.

Останнім часом частотні перетворювачі на IGBT – модулях (біполярних транзисторах з ізольованим затвором) отримали широке

поширення. IGBT – модуль є високоефективним елементом з малим падінням напруги, високою швидкістю та малою потужністю перемикання.

Перетворювач частоти на базі АІН з використанням IGBT – модулів, ШІМ і векторним алгоритмом управління асинхронним електродвигуном, має ряд переваг порівняно з іншими видами перетворювачів. Цей перетворювач відзначається високим значенням коефіцієнта потужності по всьому діапазоні зміни вихідної частоти.

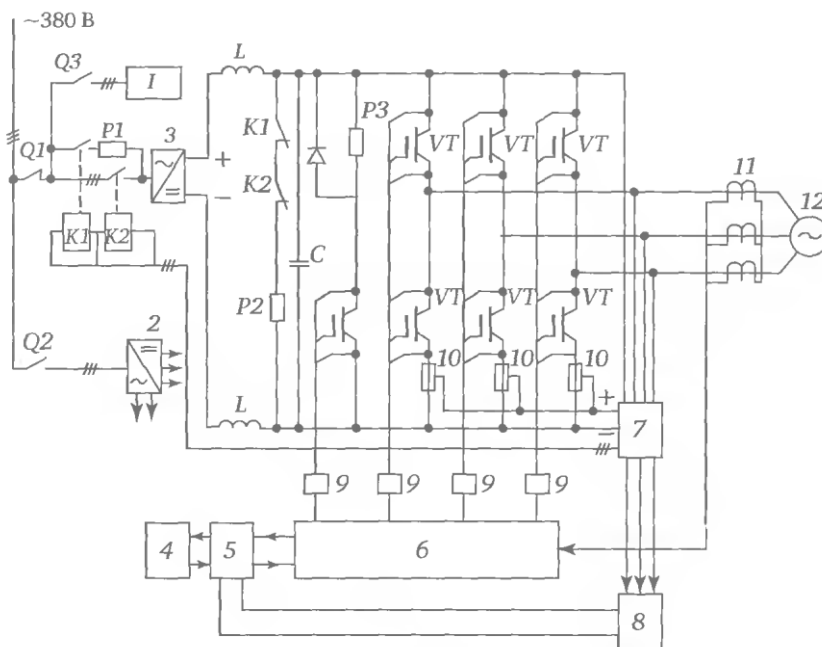


Рисунок 3.3 - Схема частотного перетворювача IGBT: 1 блок – блок вентиляторів; 2 блок – джерело живлення; 3 блок – випрямляч некерований; 4 блок – панель управління; 5 блок – плата пульта управління; 6 блок – ШІМ; 7 блок – блок перетворювача напруги; 8 блок – плата системи регулювання; 9 блок – драйвери; 10 блок – запобіжники блоку інвертора; 11 блок – датчики струму; 12 блок – асинхронний короткозамкнутий двигун; С – блок конденсаторів; K1, K2 – контактори заряду конденсаторів і силового ланцюга; Q1, Q2, Q3 – вимикачі силового ланцюга, ланцюга управління, блоку вентиляторів; R1, R2, R3 – резистори обмеження струму заряду конденсаторів, розряду конденсаторів; VT- силові ключі інвертора.

Принципова схема перетворювача зображена на малюнку 3.3. Важливо враховувати несинусоїдальні криві вихідної напруги і струму частотних перетворювачів при виборі електродвигуна для частотного електропривода. На виході частотного перетворювача формується крива напруги (струму), яка відрізняється від синусоїди і має вищі гармонічні складові. Присутність цих гармонік призводить до збільшення втрат у електродвигуні. Тому при роботі електропривода на частотах обертання, близьких до номінальних, можливе перевантаження електродвигуна. При знижених частотах обертання погіршуються умови охолодження самовентильованих електродвигунів, які використовуються в приводі насосів. У стандартному діапазоні регулювання насосних агрегатів (1:2 або 1:3) це погіршення умов вентиляції компенсується значним зменшенням навантаження за рахунок обмеження подачі та напору насоса. При роботі на частотах, близьких до номінального значення (50 Гц), погіршення умов охолодження разом із появою гармонік вищих порядків вимагає зниження допустимої механічної потужності на 8-15%. Внаслідок цього максимальний момент електродвигуна зменшується на 1-2%, ККД – на 1-4%, а коефіцієнт потужності – на 5-7%.

Щоб уникнути перевантаження електродвигуна, слід або обмежувати верхнє значення його частоти обертання, або вибрати електродвигун із більшим потужністю. Обмеження верхнього значення частоти обертання до 48 Гц є одним із способів контролю. Проте важливо зауважити, що обмеження частоти f_2 призводить до зниження положення напірної характеристики насоса. Цей аспект слід враховувати при взаємодії регульованих та нерегульованих насосних агрегатів.

Для вибору основного обладнання для частотного електроприводу слід дотримуватися наступного порядку дій:

1. Визначається потужність на валу насоса при роботі з номінальною подачею і відповідним їй напором за формулою (2.1).

2. З каталогу оберається асинхронний короткозамкнутий двигун, чия номінальна потужність має бути на 10-15% більшою, ніж потужність, що споживається насосом. Номінальна частота обертання електродвигуна повинна відповідати номінальній частоті обертання насосу.
3. Обирається серійний перетворювач частоти, чия номінальна потужність дорівнює або перевищує номінальну потужність електродвигуна насосного агрегату, а напруга перетворювача відповідає номінальній напрузі електродвигуна.

Однією з особливостей використання регульованого частотного електропривода є можливість застосування одного частотного перетворювача для приводу декількох агрегатів. Велика потужність одного перетворювача дозволяє жити одночасно кілька аналогічних агрегатів. Також можливе підключення до одного частотного перетворювача агрегатів, що мають схожу потужність.

Також відомий метод регулювання обертання електродвигунів шляхом зміни їх ковзання. У цьому випадку регулювання може бути виконане різними способами:

1. Встановленням додаткового резистору.
2. Реалізацією електроприводу за схемою асинхронного вентильного каскаду (ABK).

Регулювання обертання електродвигунів може здійснюватися шляхом зміни напруги на їх статорі, або зміною числа пар полюсів. Для цього використовуються системи електроприводу на основі вентильних електродвигунів.

Проаналізуємо групове управління регульованими електроприводами агрегатів. Багато насосних установок складаються з кількох агрегатів, але не всі вони оснащені регульованим електроприводом. Зазвичай, достатньо

оснастити регульованим електроприводом лише один з 2-3 встановлених агрегатів.

Якщо один перетворювач постійно підключений до одного з агрегатів, може виникнути нерівномірна витрата моторесурсу, оскільки агрегат з регульованим електроприводом використовується значно більше часу.

Для забезпечення рівномірного розподілу навантаження між усіма агрегатами розроблені станції групового управління [2]. Ці станції дозволяють агрегатам по чергово підключатися до перетворювача. Зазвичай, станції управління виготовляють для низьковольтних агрегатів.

Низьковольтні станції управління зазвичай призначені для керування 2-3 агрегатами. Склад таких станцій управління включає автоматичні вимикачі, які забезпечують захист від міжфазних коротких замикань та замикань на землю, теплові реле для захисту агрегатів від перевантаження, а також апаратуру управління.

Схема комутації станції управління включає необхідні блокування, які дозволяють підключити перетворювач частоти до будь-якого обраного агрегату і провести заміну працюючих агрегатів без порушення технологічного режиму насосного обладнання.

Автоматизовані станції управління здійснюють:

- Утримання в заданих межах технологічних параметрів (тиск, рівень, температура).
- Моніторинг режимів роботи електродвигунів управляємих та неуправляємих агрегатів (контроль струму, споживаної потужності) та їх захист.
- Автоматичне введення в роботу резервного агрегату при аварії основного.
- Переключення агрегатів безпосередньо на мережу при відключенні частотного перетворювача.
- Автоматичне введення резервного електричного вводу (ABP).

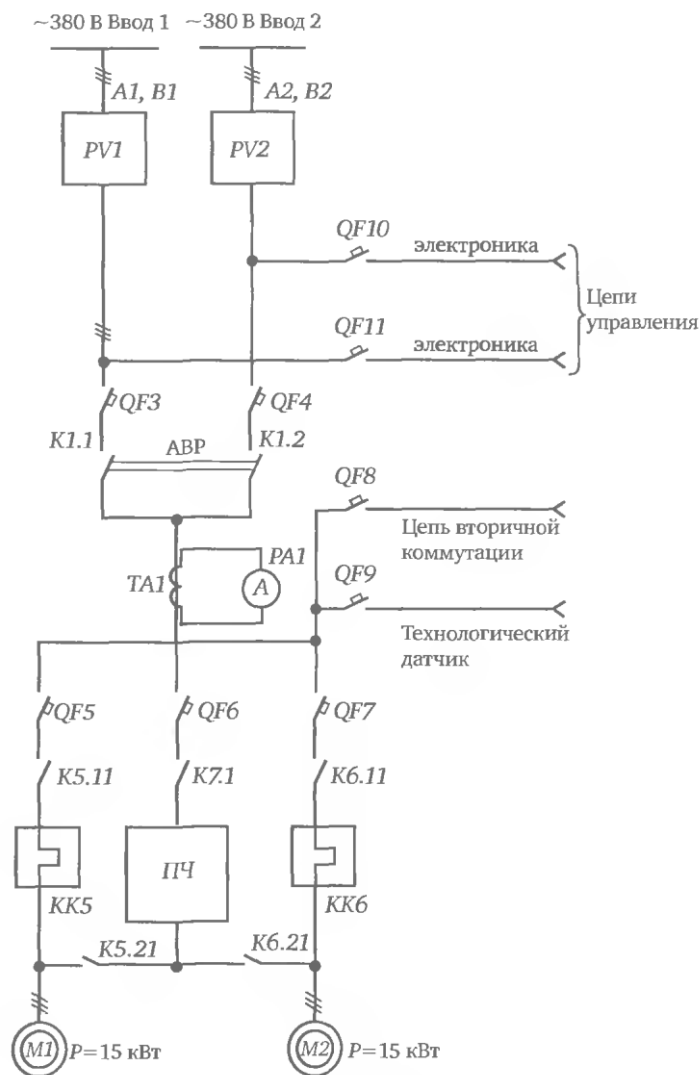


Рисунок 3.4 - Схема групового управління низьковольтними електроприводами з перетворювачами частоти.

Функціонал автоматизованих станцій управління також включає:

- Автоматичне відновлення роботи станції (АПВ) після відключення напруги в живлячій мережі.
- Автоматичну зміну режиму роботи станції, включаючи зупинку і запуск агрегатів у визначений час.
- Автоматичну зміну черги працюючих агрегатів через визначені інтервали часу для забезпечення рівномірної витрати ресурсів.

- Автоматичне включення в роботу додаткового неуправляемого агрегату, якщо регульований агрегат, працюючи з номінальною частотою, не забезпечує необхідну подачу.
- Оперативне керування режимами роботи насосної станції з панелі управління чи з диспетчерського пульта.

3.2. Регульовані електроприводи з використанням варіаторів частоти обертання

Регульовані електроприводи інколи використовують електродвигуни, які майже постійно обертаються з однією і тією ж самою частотою. У таких електроприводах використовуються нерегульовані синхронні або асинхронні короткозамкнуті електродвигуни та пристрій, що змінює постійну частоту обертання електродвигуна на змінну частоту обертання насосу (див. рис.3.5). До цих пристроїв відносяться механічні і гідравлічні варіатори, гідравлічні і електромагнітні муфти ковзання різних типів. Основною перевагою цих електроприводів є їхній низький кошт та можливість використання простих і надійних нерегульованих електродвигунів будь-якого типу (синхронних, асинхронних короткозамкнутих та ін.)

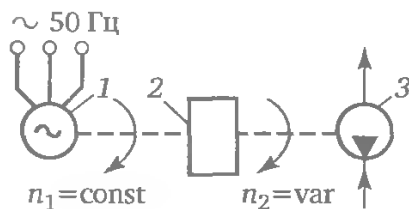
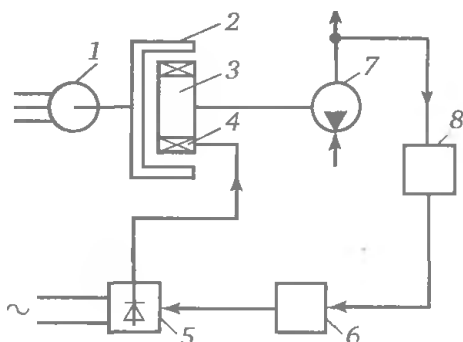


Рисунок 3.5 - Привод з використанням варіаторів частоти обертання: 1 – асинхронний двигун; 2 – варіатор; 3 – насос.

Також використовують системи приводу з електромагнітними муфтами ковзання. В системах приводу насосів частіше за все використовують електромагнітні муфти ковзання індукторного типу (ІМК). Індукторна муфта ковзання (рис.3.6) складається з індуктора з обмоткою збудження і якоря. Обмотка збудження отримує живлення від джерела постійного або випрямленого струму. Якір ІМК пов'язаний з асинхронним короткозамкнутим (або синхронним) електродвигуном, а індуктор – з механізмом (насосом). Якір і індуктор виготовляють із масивних відливок та паковок. Обертаючий момент від двигуна до насосу передається через електромагнітне поле в зазорі між якорем та індуктором. Частота обертання насосу регулюється за допомогою зміни струму збудження ІМК.



47

3.3. Застосування гідравлічного каскаду

Незважаючи на усі переваги регульованого електроприводу, виникають проблеми під час експлуатації насосних установок, які не завжди можна вирішити за його допомогою. Наприклад, серйозні труднощі виникають при встановленні режимів роботи відцентрових насосів з лабільними (помпажними) характеристиками $Q-H$. Багато насосів, які використовуються у системах водопостачання та водовідведення, саме такі мають характеристики. У таких насосів можуть виникати проблеми при низьких подачах, коли вони потрапляють у режим "помпажу". Крім того, при малих подачах насос працює із дуже низьким ККД.

Використання дроселювання в даному випадку неприпустиме через те, що робоча точка насоса, застосовуючи цей метод регулювання, все одно навіть при руху по напірній характеристиці $Q-H$ потрапляє в нестійку зону роботи насоса. Регулювання частоти обертання також вважається неприпустимим, оскільки при зниженні частоти обертання характеристика відцентрового насоса стискатиметься і стане більш крутою, але основна конфігурація залишиться незмінною, з утриманням зони помпажу.

Режим помпажу не лише супроводжується ударами в гідравлічному тракті агрегату, але й призводить до різких змін струму в електричному ланцюзі, включаючи частотний перетворювач. Це відбувається через зміну подачі насоса, що супроводжується зміною споживаної потужності та струму.

У таких умовах експлуатаційний персонал часто використовує неефективний метод регулювання, який включає скидання частини води з напірних комунікацій у всасуючі комунікації (див. криву 1 на рис.3.8). В такій ситуації бажано використовувати метод регулювання насосних установок із застосуванням гідравлічного каскаду [2].

Система гідравлічного каскаду (зображена на рис.3.7) дозволяє відновлювати енергію води, яка раніше скидалася, і відправляти її назад в

систему енергопостачання насосної установки. Це робить цей метод регулювання технічно можливим та економічно доцільним за певних умов.

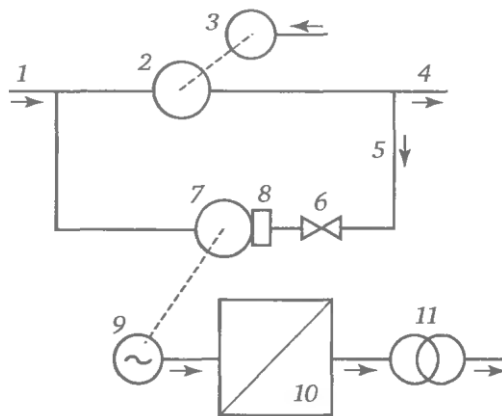


Рисунок 3.7 - Принципова схема гідралічного каскаду: 1 – всмоктуюча лінія насосу; 2 – насос; 3 – привідний асинхронний двигун насосу; 4 – напірна лінія; 5 – зливна лінія; 6 – затвір регулювання; 7 – гідротурбіна; 8 – направляючий пристрій гідротурбіни; 9 – генератор електроенергії; 10 блок – частотний перетворювач; 11 – узгоджувальний трансформатор.

Гідралічний каскад включає в себе гідрогенератор, призначений для перетворення енергії потоку води, яка раніше скидалася, спочатку в механічну, а потім в електричну енергію. Оскільки кількість води, що скидається, постійно змінюється під час регулювання режиму роботи насосної станції, гідрогенератор працює зі зміною частоти обертання, що призводить до значних змін частоти електричного струму на виході генератора. Для ефективного рекуперації цієї енергії в мережу необхідно перетворити струм змінної частоти на струм стандартної частоти 50 Гц. Це досягається за допомогою частотного перетворювача, який входить до складу гідралічного каскаду. Також для вирівнювання напруги гідрогенератора з напругою живлячої електричної мережі встановлюється узгоджувальний трансформатор.

В установках з достатньо великою потужністю (500 - 630 кВт і більше) гідралічний каскад стає економічно доцільним вибором. Оснащення

насосної установки гідравлічним каскадом не вимагає виведення основних насосних агрегатів із резерву на час монтажу.

Гідравлічний каскад гарантує сталу ефективну роботу насосних агрегатів, зберігаючи оптимальні параметри, такі як ККД, подача та напір. Водночас він упереджує різкому та значному підвищенню тиску в трубопроводах, що може виникнути під час гідравлічних ударів, спричинених втратою напруги в електричній мережі. Це досягається завдяки тому, що частину води можна відвести у всмоктувальні лінії або в приймальні резервуари, що зменшує негативні наслідки таких ситуацій.

Розглянемо залежність споживаної насосом потужності від подачі при різноманітних способах регулювання (рис.3.8).

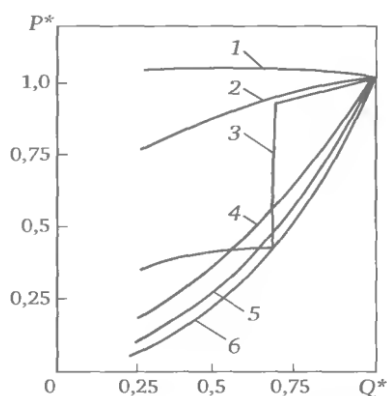


Рисунок 3.8 - Залежність споживаної насосом потужності від подачі різними способами регулювання.

Зазначені графіки представляють значення потужності та подачі відносно один одного для порівняння. Криві 1 та 2 представляють агрегати з постійною частотою обертання, де регулювання відбувається шляхом скидання рідини в приймальний резервуар через байпас та дроселювання напірних ліній, відповідно. Крива 3 відноситься до насосів зі змінною частотою обертання. Криві 4–6 відображають споживання потужності насосами, частота обертання яких змінюється за допомогою різних типів

регульованого привода: із втратами ковзання, із рекуперацією втрат ковзання і без втрат ковзання, відповідно.

Графіки на рис. 3.8 демонструють, що регулювання подачі води при змінній частоті обертання двигуна виконується з меншими витратами енергії, чим при постійній частоті обертання.

3.4. Оптимізація режимів роботи частотнорегульованого асинхронного електропривода.

Задача оптимізації режимів частотнорегульованого асинхронного електропривода ставить за мету досягнення екстремуму функції якості або критерію оптимальності. У випадку електроприводів, важливим енергетичним та надійнісним критерієм якості є втрати потужності. Вимоги до оптимальності з урахуванням втрат можна розглядати в контексті двигуна, частотного перетворювача та в цілому для електропривода.

Пошук оптимального режиму управління для мінімізації втрат двигуна має важливе значення в наступних випадках:

- При меті забезпечення мінімуму та розширення області допустимих моментів навантаження для забезпечення оптимальних умов роботи двигуна.
- Для аналізу ефективності законів частотного управління за критерієм втрат при застосуванні в якості еталона управління для забезпечення мінімуму втрат у асинхронному двигуні.

Метою в цих сценаріях є гарантування надійної роботи асинхронного двигуна, оскільки навіть незначне перевищення температури обмотки статора над допустимим може призвести до швидкого старіння ізоляції та скорочення терміну служби електродвигуна.

Оптимізація режимів електропривода з метою мінімізації втрат в системі частотного перетворювача та асинхронного двигуна має практичне значення, коли електропривід розглядається як споживач електроенергії. У

цьому контексті важливо розуміти, яким чином втрати в асинхронному двигуні та частотному перетворювачі відносяться до умов мінімізації загальних втрат в системі.

Розв'язання задачі оптимального управління, яке отримане без врахування насичення машини, може бути застосоване в обмеженій області зміни моменту (M) і кутової швидкості обертання (ω). При широкому діапазоні змін моменту і швидкості обертання магнітне коло асинхронного двигуна насичується. У такому випадку врахування насичення асинхронного двигуна по головному магнітному шляху має ключове значення при вирішенні задач екстремального управління. Розходження між якісними та кількісними характеристиками екстремальних значень, представлених в [8], свідчать про необхідність врахування насичення при зміні моменту в широкому діапазоні.

При врахуванні насичення магнітного кола вирішення задачі оптимізації за мінімумом втрат асинхронного двигуна значно ускладнюється. Тим не менше, за певних умов і допущень можливе аналітичне рішення цієї задачі.

Аналітичні підходи виявляються досить простими, однак їх можна застосовувати лише в обмеженому діапазоні зміни моменту навантаження двигуна. З використанням параметричної форми для вираження закону оптимального управління ускладнюється процес розв'язання задачі порівняльної оцінки ефективності законів частотного управління, особливо коли момент і швидкість двигуна задані параметрами технологічного процесу. У таких ситуаціях рекомендується використовувати чисельні алгоритми для пошуку екстремуму функції втрат.

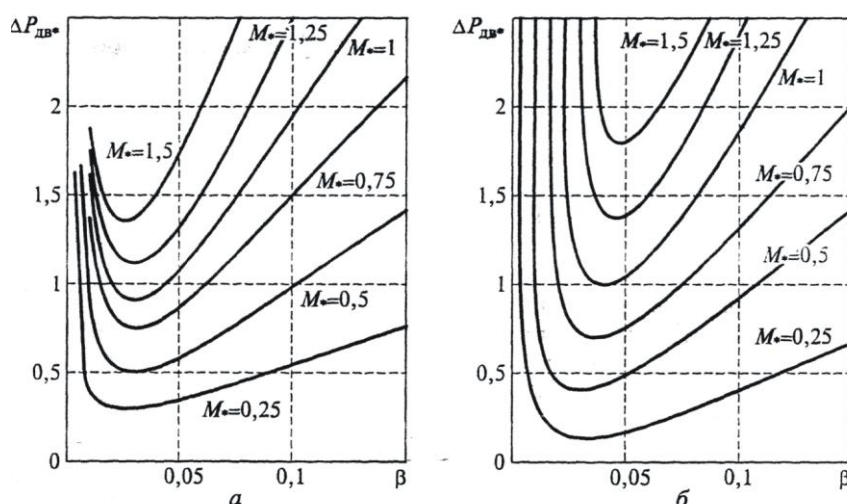


Рисунок 3.9 - Екстремальні характеристики асинхронного двигуна типу 4А132М6 для відносного значення швидкості $\omega^*=1$ та різних відносних значеннях моменту M_* без урахування насичення (а) та із врахуванням головного магнітного шляху (б).

На рисунку 3.9 представлені характеристики асинхронного двигуна типу 4А132М6 при оптимальному управлінні з мінімізацією $\Delta P_{\text{дв}}$ для різних відносних значень кутової швидкості ω^* . Ці характеристики відповідають фіксованим значенням швидкості ω_* . При постійних значеннях швидкості $\omega_* > 0,1$ залежність абсолютного ковзання від моменту є нелінійною (див. рисунок 3.10, а), і зі збільшенням швидкості нелінійна ділянка залежності охоплює все більший діапазон змін моменту. Виявляється, що залежність абсолютного ковзання від швидкості найбільше виражена в зоні малих значень моменту навантаження, а саме при $M_* < 0,5$. У цій самій області ковзання найменш залежить від зміни моменту.

У нелінійній області характеристики намагнічування найбільший вплив має момент навантаження, а в меншій мірі — швидкість двигуна. Наприклад, при $M_* = 0,5$ і зміні швидкості від $\omega_* = 0$ до $\omega_* = 1$ абсолютне ковзання зростає в 1,46 рази, при $M_* = 1$ — в 1,36 рази, і при $M_* = 2,2$ — в 1,02 рази. При зміні навантаження в діапазоні від $M_* = 1$ до $M_* = 2,2$ абсолютне ковзання зростає при швидкості $\omega_* = 1$ в 2,34 рази, а при $\omega_* = 0$ в 5,15 рази.

Величина оптимального абсолютного ковзання в точці ($M_{ном*}, \omega_{ном*}$) менша за номінальне значення на 29%.

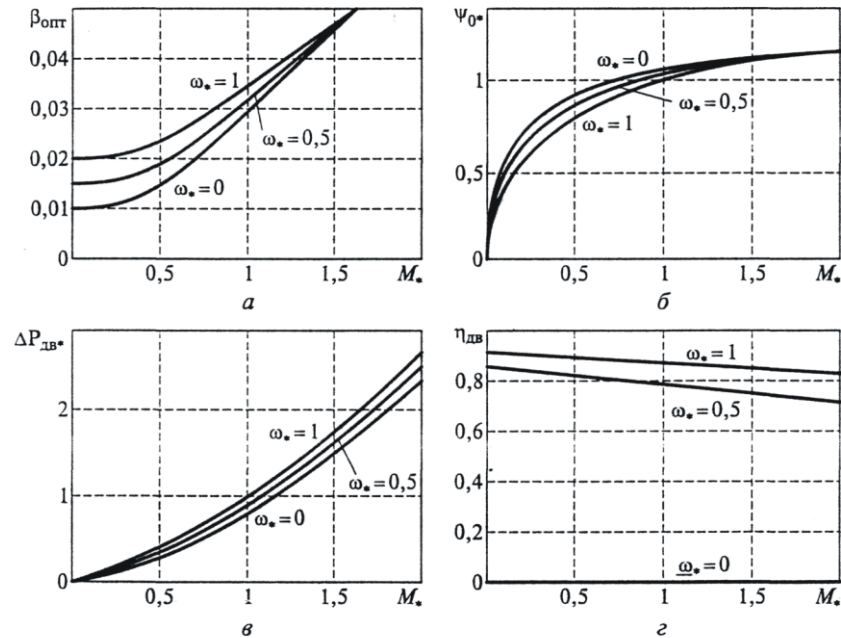


Рисунок 3.10 - Характеристики асинхронного двигуна типу 4A132M6 при оптимальному управлінні за мінімумом $\Delta P_{дв}$ з різними відносними значеннями кутової швидкості ω_* : а – графіки абсолютного ковзання; б – графіки головного потокозчеплення; в – графіки сумарних втрат; г – коефіцієнт корисної дії

З рисунку 3.11 видно, що при зміні M_* і ω_* оцінки ефективності змінюються в широкому діапазоні. Значення $\Delta P_{дв}(M_*, \omega_*)$ суттєво зростають із зменшенням M_* і ω_* , а також при M_* , які перевищують значення моменту в номінальному режимі асинхронного двигуна.

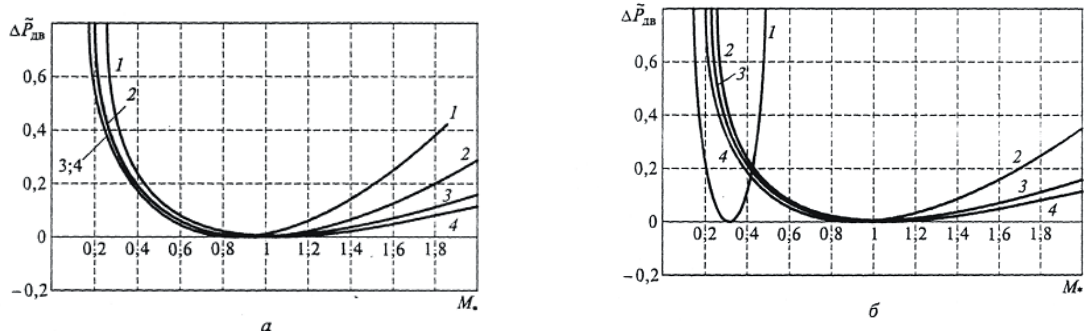


Рисунок 3.11 - Залежність оцінювання ефективності АД типу 4A132M6 при кутовій швидкості $\omega_* = \omega_{\text{ном}*}$ (а) та $\omega_* = 0.1$ (б)

Оптимізація режимів роботи системи ПЧ-АД за мінімумом сумарних втрат $\Delta P_{\text{ен}}$.

У процесі формулювання цього завдання цікаво вивчити вплив режимів роботи двигуна на характеристики перетворювача частоти, зокрема на втрати потужності $\Delta P_{\text{ПЧ}}$.

Дослідження статичних характеристик асинхронного двигуна вказують на його екстремальні параметри за різними критеріями якості. Серед них виокремлюються екстремуми струму статора i_1 та активної потужності P_1 двигуна, які визначають рівень електричних втрат перетворювача частоти. Для вирішення завдання оптимізації режимів системи ПЧ-АД з мінімізацією втрат ми отримаємо необхідні вирази:

$$i_{1*}(M_*, \beta) = \left[\frac{\varepsilon_1(\beta) \beta_{\text{ном}}}{\varepsilon_{1\text{ном}} \beta} M_* \right]^{1/2};$$

$$P_{1*}(M_*, \omega_*, \beta) = \left[\frac{\beta}{\beta_{\text{ном}}} \omega_* + k'_c \frac{\varepsilon_1(\beta)}{\varepsilon_{1\text{ном}}} + k'_p \frac{\varepsilon_2(\beta)}{\varepsilon_{2\text{ном}}} + k'_t \frac{\delta_0(\beta_*)}{\delta_{0\text{ном}}} \omega_{1*} + k'_b \frac{\delta_0^2(\beta_*)}{\delta_{0\text{ном}}^2} \omega_{1*}^2 \right] \frac{\beta_{\text{ном}}}{\beta} M_*.$$

(3.5)

Оптимальне ковзання, яке забезпечує мінімум функції втрат $\Delta P_{\text{ен}}(M, \omega, \beta)$, здійснюється чисельними методами. На рисунку 3.12 представлені характеристики закону оптимального управління та ККД системи ПЧ-АД у

режимі $\Delta P_{\text{еп}^*} \rightarrow \min$. Приведені на рисунку 3.12, а графіки оптимального за мінімумом $\Delta P_{\text{еп}^*}(M_*, \omega_*, \beta)$ управління $\beta_{\text{опт}} = \beta_{\text{опт}}(M_*, \omega_*)$ розраховуються для ряду фіксованих величин кутової швидкості ($0 < \omega_* < 1$, крок швидкості $\Delta\omega_* = 0,25$). Зрівнюючи їх з графіками оптимального за мінімумом сумарних втрат АД управління, можемо знайти їх якісний збіг.

Залежності ККД системи ПЧ -АД від M_* і ω_* (рисунок 3.12, б) демонструють *ефективність оптимального режиму за мінімумом $\Delta P_{\text{еп}^*}(M_*, \omega_*, \beta)$ управління з точки зору енергоефективності*.

Таким чином, проведений аналіз можливостей оптимального управління частотно-регульованим асинхронним двигуном за рядом показників, а також наведені загальні кількісні оцінки, що визначають різні закони оптимального управління, дозволяють обґрунтовано вибирати та впроваджувати необхідний закон управління в залежності від параметрів та режимів роботи асинхронного двигуна.

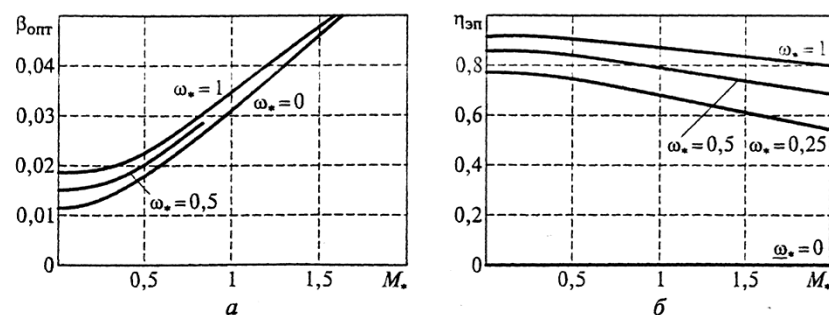


Рисунок 3.12 - Характеристики закону оптимального управління (а) та ККД (б) системи ПЧ – АД при витратах $\Delta P_{\text{еп}^*} \rightarrow \min$.

Кількісна оцінка $\Delta P_{\text{дв}}$ при оптимальних режимах управління показує практичне їх співпадіння. Так, перевищення $\Delta P_{\text{дв}}$ мінімально можливих втрат в двигуні в режимі управління за мінімумом струму статора при $0.2 \leq M_* \leq 1.2$ і $0.25 \leq \omega_* \leq 1.25$ складає 8%.

4 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СТРУКТУРА НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ З АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Проведення аналізу режимів роботи насосних установок має на меті визначення ключових параметрів, необхідних для розробки систем автоматизованого управління та виконання техніко-економічних розрахунків.

Серед цих параметрів можна виділити:

- максимальна подача протягом розрахункового періоду Q_6 , $\text{м}^3/\text{с}$;
- мінімальна подача протягом розрахункового періоду Q_m , $\text{м}^3/\text{с}$;
- напір, що відповідає максимальній подачі H_6 , м;
- протитиск в системі H_p , м;
- діапазон коливання рівня води в резервуарах ΔH , м.

Під час аналізу, використовуючи отримані дані з опитувальних листів, розробляються добові графіки подачі насосних установок для максимальних та мінімальних значень протягом доби. Відповідно до цих графіків будуються залежності напору на всасуючих та напірних лініях насосів, а також на напірному колекторі установки.

Вибір регульованого електроприводу повинен базуватися на результати техніко-економічних розрахунків та порівняння різних варіантів.

Рекомендується встановлювати регульований електропривід для двох-трьох насосних агрегатів, якщо кількість агрегатів на станції складає від 4 до 6, і для трьох-чотирьох агрегатів, якщо кількість агрегатів становить від 7 до 8. При орієнтовній оцінці можна враховувати, що приблизно $1/3$ - $1/2$ встановлених агрегатів на станції слід обладнати регульованим електроприводом.

Максимальною кількістю насосних агрегатів (з урахуванням резервних) слід вважати 12-15 агрегатів. У цьому випадку кількість агрегатів з регульованим електроприводом повинна бути не менше 4-5.

З метою уникнення утворення так званих "мертвих зон" під час регулювання напірна характеристика регульованого насосу повинна бути розміщена кілька одиниць вище характеристики нерегульованого насосу. Таким чином, рекомендується обладнувати регульованим електроприводом найбільші насоси з більш пологою характеристикою $Q-H$.

При визначенні кількості регульованих насосів, важливо враховувати, що зниження частоти обертання одного з насосів може призвести до перевантаження нерегульованих насосів, вивести робочі точки нерегульованих насосів за межі робочої зони, знизити їх ККД і в особливих випадках спричинити кавітацію. Якщо існує можливість таких умов, рекомендується встановлювати регульований електропривід на всіх насосних агрегатах і синхронізувати зміну частоти обертання насосів, що працюють паралельно.

При проведенні аналізу режимів роботи насосних установок систематизуються дані щодо щорічного споживання електроенергії, питомих витрат енергії на подачу води та перекачку стоків, вартості споживаної енергії та поданої води.

Визначається максимальна та мінімальна кількість насосів, які беруть участь у процесі водоподачі та водовідведення протягом розрахункового періоду, а також визначаються типи цих насосів.

4.1. Економічний ефект регулювання частоти обертання насосів при зміні графіку водоспоживання

Основні технологічні показники насосної станції:

- найбільша продуктивність – $Q_6 = 100 \text{ м}^3/\text{год}$ ($0,029 \text{ м}^3/\text{с}$);
- найменша продуктивність $Q_m = 38 \text{ м}^3/\text{год}$ ($0,012 \text{ м}^3/\text{с}$);
- діапазон зміни подачі протягом розрахункового періоду

$$\lambda = Q_m / Q_6 = 38/100 = 0,38;$$

- Крутизна характеристики трубопровода:

$$H_{\pi}^* = H_{\pi} / H_6 = 10 / 32 = 0,31$$

- $H_6 = 32$ м - тиск при найбільшій подачі
- $H_{\pi} = 10$ м - статичний противотиск системи подачі води;
- Крутизна характеристики насоса:

$$H_{\phi}^* = H_{\phi} / H_6 = 40 / 32 = 1,25$$

- $H_{\phi} = 40$ м – прийнята висота водопідйому за нульової подачі насосу;
- $T = 8760$ год- розрахунковий період.

В таблиці 4.1 представлені показники зміни подачі води впродовж доби. Як видно з таблиці звчення подачі води змінюється приблизно у 2 рази.

Таблиця 4.2. Показники зміни подачі води впродовж доби.

t,год.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q,м3/год	38,0	38,0	40,0	42,0	42,0	52,0	71,0	100,0	100,0	88,0	52,0	40,0
t,год.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Q,м3/год	40,0	38,0	40,0	42,0	52,0	71,0	88,0	100,0	100,0	100,0	71,0	52,0

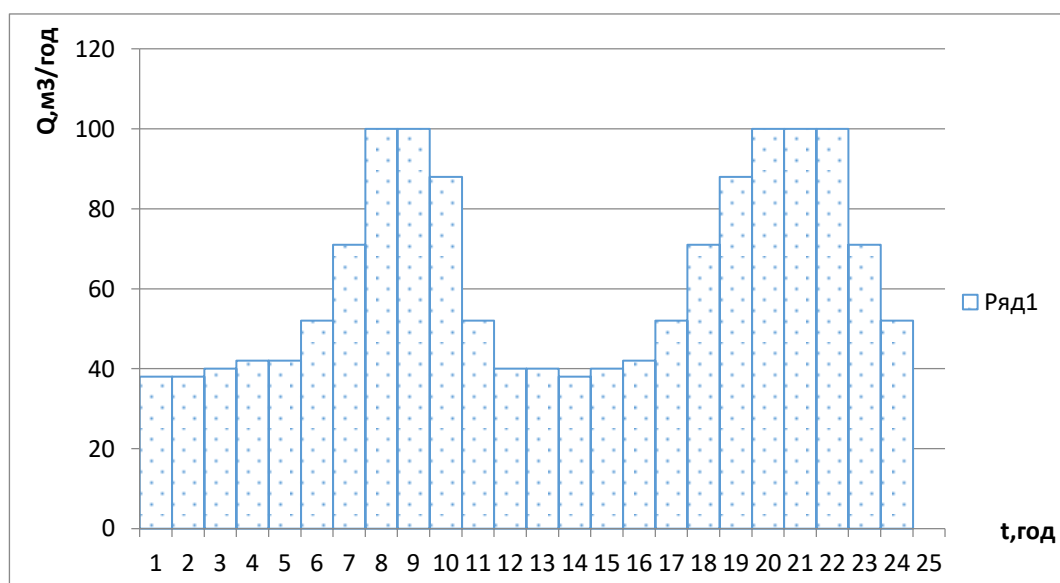


Рисунок 4.1 - Добовий графік водоспоживання насосним агрегатом.

Обираємо асинхронний привод для забезпечення водопостачання.

Потужність, що споживається насосом при максимальній подачі:

$$N_{\phi} = \frac{9,8 \cdot Q_{\phi} \cdot H_{\phi}}{\eta_n} = \frac{9,81 \cdot 0,029 \cdot 51}{0,73} = 18,98 \text{ кВт} \quad (4.1)$$

Встановлюємо насоси GRUNDFOS типу CRE: CRE 90-2-1

Двигун з потужністю 22 кВт, $H_{\phi} = 40$ м

Потужність, кВт, яка споживається асинхронним двигуном, визначається за формулою:

$$P = \frac{N}{\eta_{ед}} = \frac{22}{0,877} = 25,11 \text{ кВт} \quad (4.2)$$

Характеристика насоса - це залежність натиску H від витрати Q , яку з достовірно можна представити у вигляді :

$$H = H_{\phi} \cdot (n/n_{ном})^2 - C \cdot Q^2 \quad (4.3)$$

де H_{ϕ} - натиск насоса при $Q = 0$ і $n = n_{ном}$; $n_{ном}$ - номінальна швидкість асинхронного двигуна; C – конструктивний коефіцієнт насосу; $Q_{ном}$ і $H_{ном}$ - номінальна витрата і натиск.

Характеристика насоса показана на рис. 4.2.

Показники для побудови характеристик насоса наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Показники для побудови характеристик насосу.

Q , м ³ /год	0	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0	110,0
H , м	40,0	39,680	38,70	37,120	34,90	32,00	30,30

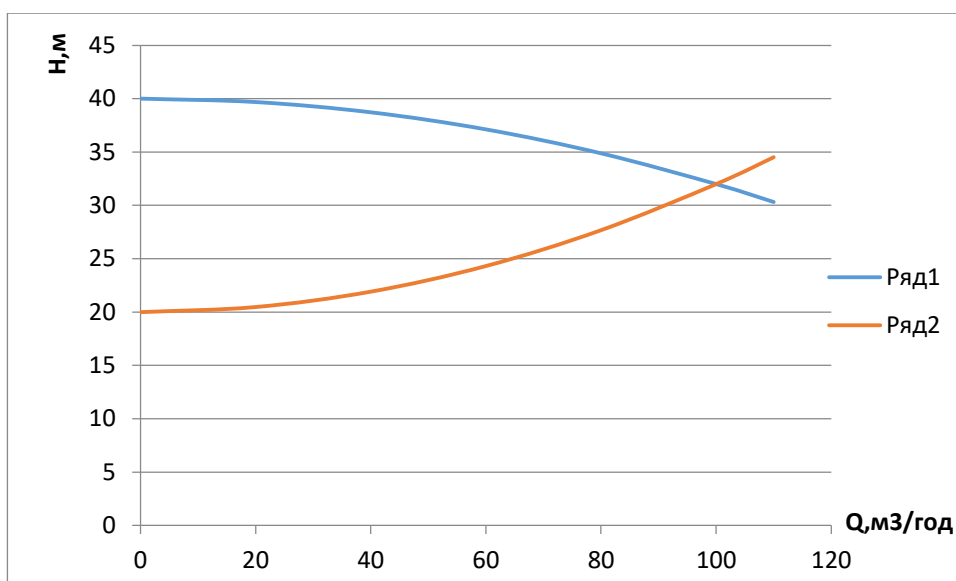


Рисунок 4.2 - Характеристика насоса (лінія 1) та характеристика магістралі (лінія 2).

Характеристика магістралі визначається за наступним виразом:

$$H_c = H_n + S \cdot Q^2 ; \quad (4.4)$$

де H_n – величина статичного натиску (протитиск), що відповідає $Q=0$ (закритій задвижці); R – значення коефіцієнт опору магістралі:

Таблиця 4.4. Параметри насосу та магістралі.

Параметри насосу		Параметри магістралі	
H_ϕ	40 м	H_n	20 м
$H_{ном}$	32 м	$H_{ном}$	32 м
$Q_{ном}$	100 м³/год	$Q_{ном}$	100 м³/год
C	0,0008	S	0,0012
$\omega_{ном}$	1450 об/хв		

Встановлюємо частоту обертання насосного двигуна при зміні рівня водоспоживання. Побудуємо нові параметри насосу при зміні швидкості обертання його двигуна..

$$n = n_{НОМ} \sqrt{\frac{H_{\Pi}}{H_{\Phi}} + \left(1 - \frac{H_{\Pi}}{H_{\Phi}}\right) \cdot \left(\frac{Q}{Q_B}\right)^2}, \quad (4.5)$$

Розрахунки представлені таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Параметри побудови характеристик насосу при зміні швидкості обертання асинхронного двигуна.

Q, м³/год	H, м	H ₁ , м	H ₂ , м	H ₃ , м	H ₄ , м	H ₅ , м	H ₆ , м
0	40,0	20,0	36,191	30,035	26,165	24,415	23,281
20,0	39,68	20,481	35,875	29,719	25,844	24,092	22,962
40,0	38,72	21,923	34,912	28,752	24,881	23,134	22,0
60,0	37,12	24,322	33,312	27,155	23,282	21,532	20,42
80,0	34,88	27,688	31,076	24,914	21,041	19,291	18,165
100,0	32,00	32,0	28,192	22,034	18,163	16,413	15,281
110,0	30,32	34,521	26,511	20,351	16,486	14,738	13,66

Характеристики насосу зображені на рис. 4.3.

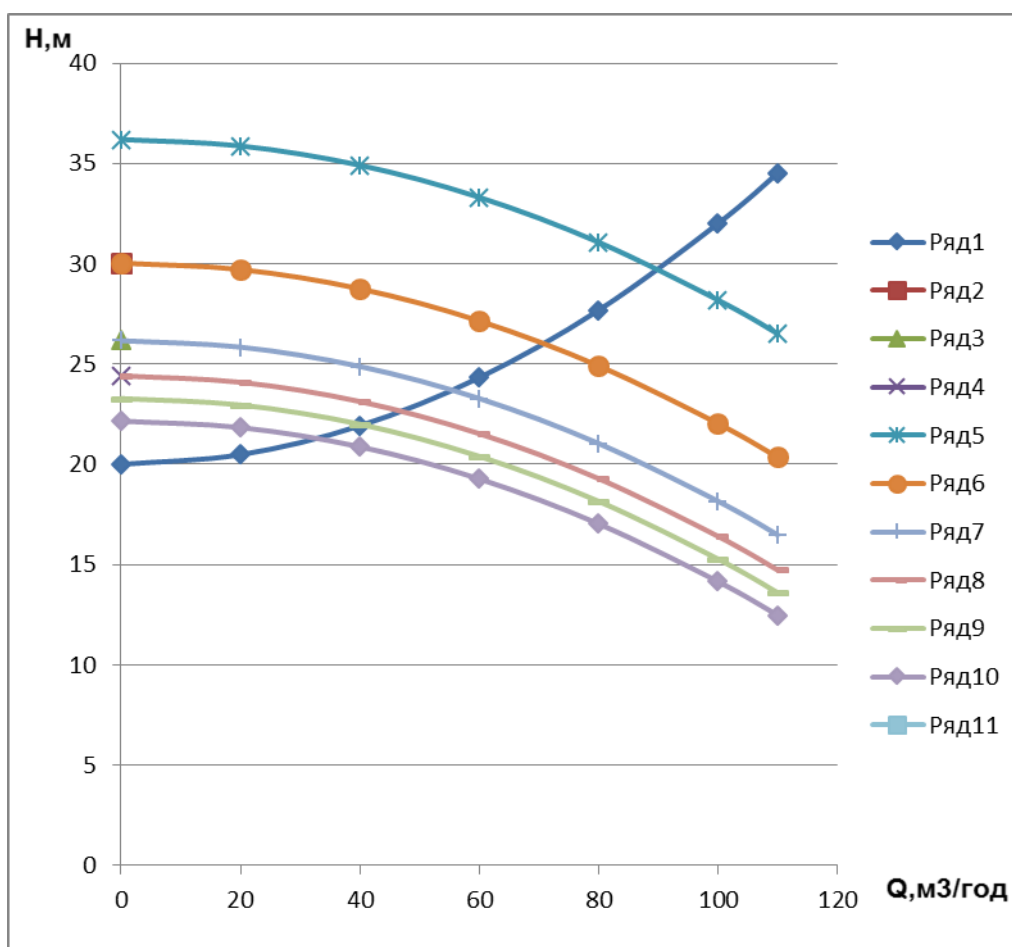


Рисунок 4.3 - Характеристики насоса в результаті зміни швидкості обертання асинхронного двигуна.

Визначаємо електропотужність, що використовується насосним агрегатом при різних методах управління. Проводимо аналіз зменшення споживання електроенергії при регулюванні частотою порівняно з регулюванням за допомогою заслінки [13].

Для цього використовуємо дані, представлені на рис. 4.4 [13], де подані відомості про потужність, яку використовує електропривід центробежного насоса шляхом дросельного та частотного регулювання залежно від витрат рідини і статичного напору в відносних одиницях. Побудуємо графік для значення $h_c = 0.4$.

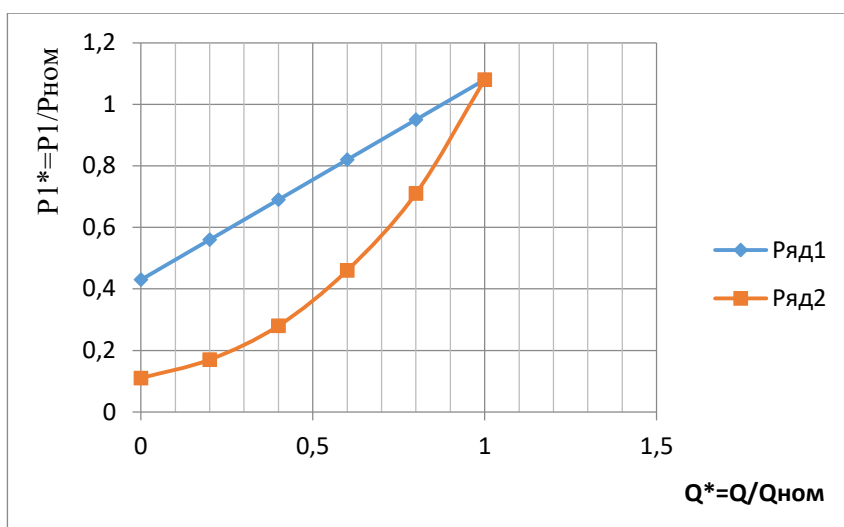


Рисунок 4.4 - Характеристики $P_{1*} = f(Q_*)$ при дросельному (лінія 1) і при частотному (лінія 2) регулюванні.

Таблиця 4.6. Економічні показники потужності, споживаної насосним агрегатом при різних способах регулювання роботи.

Час	Q, м3/год	Q/Q _{ном}	P/P _{ном} (дрос)	P/P _{ном} (част)	ΔP	ΔP, кВт	ΔE, грн
0-1	38,0	0,380	0,910	0,580	0,330	8,290	11,320
1-2	38,0	0,380	0,910	0,580	0,330	8,290	11,320
2-3	40,0	0,400	0,800	0,400	0,400	10,050	13,720
3-4	42,0	0,420	0,710	0,280	0,430	10,800	14,750
4-5	42,0	0,420	0,710	0,280	0,430	10,800	14,750
5-6	52,0	0,520	0,710	0,280	0,430	10,800	14,750
6-7	71,0	0,710	0,800	0,400	0,400	10,050	13,720
7-8	100,0	1,000	0,960	0,700	0,260	6,530	8,920
8-9	100,0	1,000	0,910	0,580	0,330	8,290	11,320
9-10	88,0	0,880	0,910	0,580	0,330	8,290	11,320
10-11	52,0	0,520	0,710	0,280	0,430	10,800	14,750
11-12	40,0	0,400	0,820	0,480	0,340	8,540	11,660

12-13	40,0	0,400	0,820	0,480	0,340	8,540	11,660
13-14	38,0	0,380	0,800	0,400	0,400	10,050	13,720
14-15	40,0	0,400	0,800	0,400	0,400	10,050	13,720
15-16	42,0	0,420	0,800	0,400	0,400	10,050	13,720
16-17	52,0	0,520	0,960	0,700	0,260	6,530	8,920
17-18	71,0	0,710	0,960	0,700	0,260	6,530	8,920
18-19	88,0	0,880	0,960	0,700	0,260	6,530	8,920
19-20	100,0	1,000	0,960	0,700	0,260	6,530	8,920
20-21	100,0	1,000	1,090	1,090	0,000	0,000	0,000
21-22	100,0	1,000	0,990	0,820	0,170	4,270	5,830
22-23	71,0	0,710	0,990	0,820	0,170	4,270	5,830
23-24	52,0	0,520	1,020	0,90	0,120	3,010	4,120
			21,010	13,530	7,480	187,850	256,510

На рис. 4.5 зображені результати показників економії потужності, яка споживається насосом.

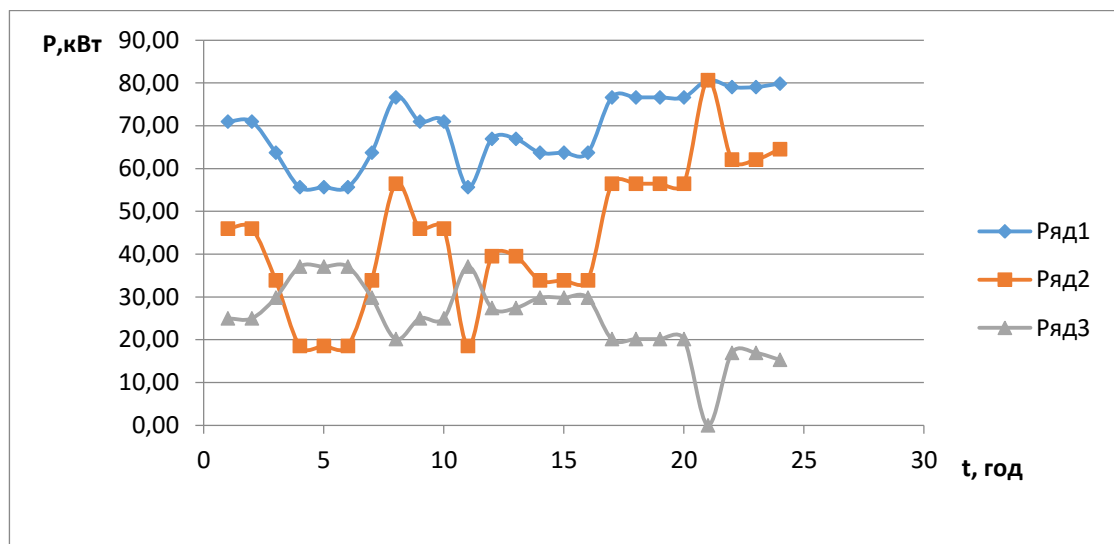


Рисунок 4.5 - Результати показників економії потужності АД, яка споживається насосом:

- 1 – активна потужність асинхронного двигуна при дросельному регулюванні;
- 2 – активна потужність асинхронного двигуна при частотному регулюванні;

З – розрахункові показники економії потужності асинхронного двигуна.

Виконуємо розрахунки добової та річної економії електроенергії при переході на частотне регулювання. Якщо вважати, що зміна потужності протягом 1 години незначна, по таблиці 4.6 можна розрахувати добове споживання енергії при дросельному та частотному регулюванні. Воно складає 527,65 кВт*год та 309,79 кВт*год відповідно. З виконаних розрахунків можна зробити висновок, що добова економія електроенергії при частотному регулюванні склала 187,85 кВт*год. При вартості електроенергії 2,7 грн/кВт*год отримаємо добову економію: $187,85 \cdot 2,7 = 507,195$ грн. Якщо не враховувати збільшення витрат води у вихідні дні, а також сезонні зміни її витрат, можна оцінити річну економію енергії у *194,456 тис.грн.*

4.2. Економічна доцільність сумісної роботі регульованих та нерегульованих електроприводів

Більшість сучасних систем підвищення тиску, що використовують насосні установки, споруджені з використанням паралельної схеми підключення насосів, що дозволяє об'єднувати потоки, що генеруються кожним насосом. Управління такими системами здійснюється на основі рівня тиску в точці регулювання, яка, як правило, розташована якнайближче до насосів.

Зазвичай управління насосами у системах підвищення тиску реалізується за такою схемою: один насос піддаваний регулюванню за допомогою перетворювача частоти (ПЧ), тоді як інші працюють у режимі максимальної продуктивності.

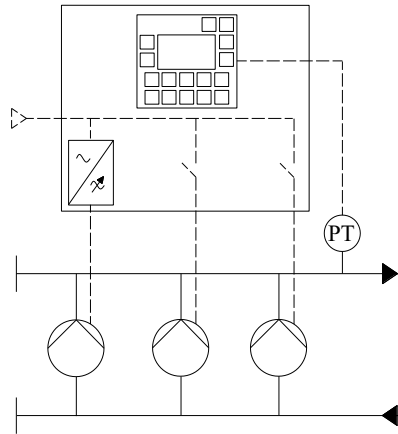


Рисунок 4.6 - Схема насосної установки збільшення тиску при паралельно працюючих насосах.

Графіки взаємодії регульованих насосів подані у вигляді, зображеному на рис. 4.7 [8].

Наявність насоса з можливістю регулювання в системах підвищення тиску забезпечує утримання заданого тиску в напірній магістралі при змінній витраті з боку споживачів. Основною перевагою схеми із одним регульованим насосом є низька вартість апаратної частини. Проте для такої схеми неодмінно виникають енергетичні втрати, пов'язані з перерозподілом потужності між працюючими насосами з різною продуктивністю. Такі втрати завжди потрібно враховувати при виборі та проектуванні систем підвищення тиску.

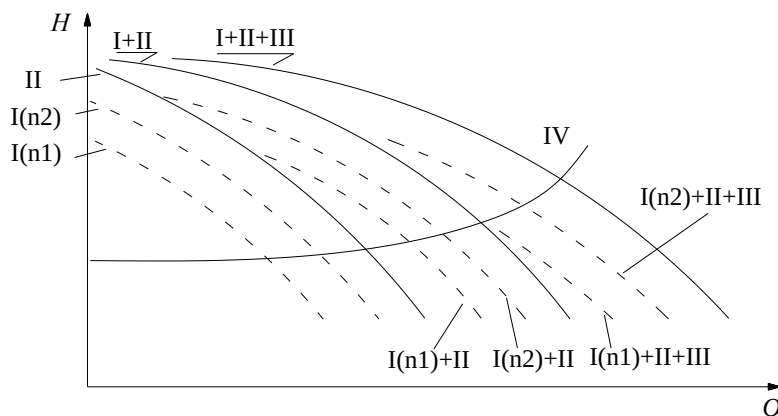


Рисунок 4.7 - Графіки взаємної роботи мережі та електронасосів:

I (n₁), I (n₂) - характеристики регульованого насоса з частотою обертання n₁; n₂; II, III - натискні характеристики другого і третього нерегульованих електронасосів; I+II+III - натискна характеристика взаємної роботи першого насоса в режимі максимальної продуктивності, другого та третього нерегульованих насосів; I (n₁/2) +II/ +III - натискні характеристики взаємної роботи першого регульованого насоса з частотою обертання n₁/n₂, другого / третього нерегульованих насосів; IV - характеристика трубопровода.

Насоси з однаковими технічними характеристиками можуть відрізнятися за генерованою ними гідравлічною потужністю. Гідравлічна потужність насоса визначається за його активною потужністю:

$$P = \eta \cdot P_a, \quad (4.6)$$

де η - к.к.д. насоса.

При цьому лише активна компонента гідравлічної потужності виконує корисну роботу, тоді як реактивна складова визначає втрати в системі.

Відмінність у генерованій потужності насосів, які працюють на одній напірній магістралі, обумовлена кількома факторами. Ці фактори включають зміну частоти обертання, відхилення електричних і механічних параметрів від заявлених значень, а також різне розташування насосів відносно всмоктуючого та напірного колекторів.

Такі різниці в гідравлічній потужності, що генерується насосами, спричиняють енергетичні втрати в системах підвищення тиску. У системах із одним регульованим насосом на початковому етапі цілком обґрунтовано розглядати тільки втрати, пов'язані із зміною частоти обертання регульованого насоса, і нехтувати іншими видами втрат.

Для аналізу втрат, пов'язаних із зменшенням потужності регульованого насоса при зниженні частоти його обертання, дослідимо епюри гідравлічних потужностей двох насосів із асинхронними електродвигунами. Обидва

апарати працюють на загальний напірний колектор згідно із схемою, яка показана на рис. 1. При цьому один з них регулюється перетворювачем частоти, а інший працює у режимі максимальної продуктивності.

Гідравлічна потужність (P) насоса з асинхронним електродвигуном визначається як добуток моменту на валу двигуна (M) та кутової швидкості його обертання (ω):

$$P = M \cdot \omega \quad (4.7)$$

Момент на валу електродвигуна насоса залишається відносно сталим при зміні частоти обертання електродвигуна відповідно до закону регулювання, або плавно зростає при застосуванні закону регулювання $U/f^2 = \text{const}$ [13]. Згідно з виразом (4.7), гідравлічна потужність насоса залежить від частоти або квадрату частоти його обертання. Вплив ковзання асинхронного двигуна насоса на зміну моменту на його валу мінімальний, тому для даного завдання можна ігнорувати його [13].

Для паралельної схеми роботи двох насосів допустимо, що нерегульований насос має гідравлічну потужність P_1 , а регульований - P_2 . Графіки потужностей насосів представлені на рис. 4.8.

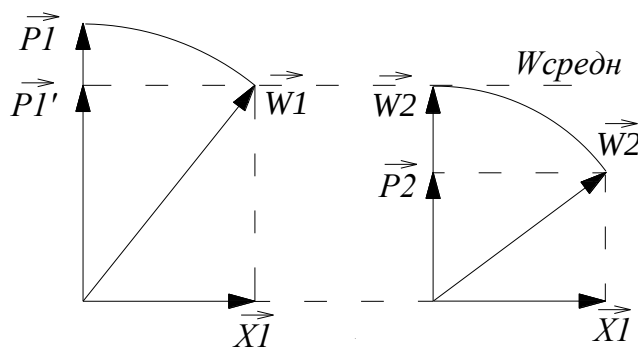


Рисунок 4.8 - Епюри потужностей двох насосів, працюючих паралельно:

$\vec{P}_1, \vec{P}_2$ - вектори активних складових гідравлічних потужностей 1-го і 2-го насоса; $\vec{X}_1$ - вектор реактивної складової гідравлічної потужності 1-го

насоса; $\vec{W1}, \vec{W2}$ - вектори повних величин гідравлічних потужностей 1-го і 2-го насосів.

Перший насос на графіках, зображених на рис. 4.8, є нерегульованим і має активне значення гідравлічної потужності $P1 = M \cdot \omega1$, в той час як другий, регульований насос, має активне значення гідравлічної потужності $P2 = M \cdot \omega2$. При цьому $\omega1 > \omega2$, що вказує на те, що $P1 > P2$.

Оскільки існує небаланс потужностей, обов'язково виникне реактивна складова вектору більшої потужності $\vec{X1}$, що спрямована в сторону вектору меншої потужності і прикладена до нього (рис. 4.8). Вектор гідравлічної потужності $\vec{P1}$ першого насоса "обертається" навколо своєї початкової точки до перетину із "середньою" величиною потужності системи із двох насосів $W_{\text{середн}}$, зберігаючи свій модуль та переходячи в вектор повної потужності $\vec{W1}$. Проекції вектору $\vec{W1}$ на осі y і x означають відповідно активну $\vec{P1}'$ і реактивну $\vec{X1}$ складові гідравлічної потужності. Реактивна складова гідравлічної потужності не виконує корисну роботу, а лише є величиною, потрібною для приведення системи в рівноважний стан відносно заданих координат $W1W2$.

Активна складова вектору $\vec{W1}$, - це проекція даного вектору на вісь y , знижується до значення $\vec{P1}'$. Реактивна складова вектору повної потужності 1-го насоса $\vec{X1}$ взаємно з вектором активної потужності 2-го насоса $\vec{P2}$ створює вектор повної потужності даного насоса, модуль якого обчислюється за виразом:

$$(W2)^2 = (P2)^2 + (X1)^2 \quad (4.8)$$

Загальна активна гідравлічна потужність комплексу з двох насосів обчислюється за виразом:

$$P\Sigma = P1' + P2 \quad (4.9)$$

Для обчислення значення $P1'$ складемо систему скалярних рівнянь :

$$\begin{cases} P1 = W1 \\ P1' = W2 \\ (P1')^2 = (W1)^2 - (X1)^2 \\ (W2)^2 = (P2)^2 + (X1)^2 \end{cases} \quad (4.10)$$

Другий вираз в (4.10) визначає умову енергетичної рівноваги розглядаємої системи генерування гідравлічної потужності. Для системи рівнянь (4.10): підставивши перший вираз в третій, другий - в четвертий, а потім, додавши третій і четвертий вираз, із врахуванням постійності моментів, отримуємо:

$$P1' = \sqrt{\frac{(P1)^2 + (P2)^2}{2}} = \sqrt{\frac{(\omega1)^2 + (\omega)^2}{2}} \quad (4.11)$$

З вираження (4.11) слідує, що середня величина потужності системи з двох насосів визначається середньоквадратичною величиною потужностей даних насосів [8].

Коефіцієнт втрат системи двох насосів, що працюють з різною потужністю, становить:

$$\tilde{K} = \frac{P1 - P1'}{P1 + P2} \quad (4.12)$$

де величина $P1'$ визначиться виразом (4.11).

У виразі (4.11) значення $\omega1$ можна використовувати як значення кутової частоти обертання f (Гц), враховуючи співвідношення $\omega = 2\pi \cdot f / p$, в якому p - число пар полюсів асинхронного двигуна.

Вираз (4.12) показує, на яке значення зменшиться ккд системи з двох насосів, якщо виникає небаланс їх потужностей.

Використовуючи вирази (4.11) та (4.12), проведемо розрахунок втрат в системах з паралельним включенням від 2 до 6 насосів, де лише 1 насос є регульованим, а інші працюють у режимі постійної продуктивності. Розрахунки будуть здійснені виключно для втрат, пов'язаних із зміною потужності регульованого насоса.

На рис. 4.9 наведені графіки залежностей коефіцієнта втрат від частоти обертання регульованого насоса для систем з різною кількістю насосів. Коефіцієнт втрат визначає, наскільки зменшується коефіцієнт корисної дії системи з різною кількістю насосів при зміні частоти обертання регульованого насоса.

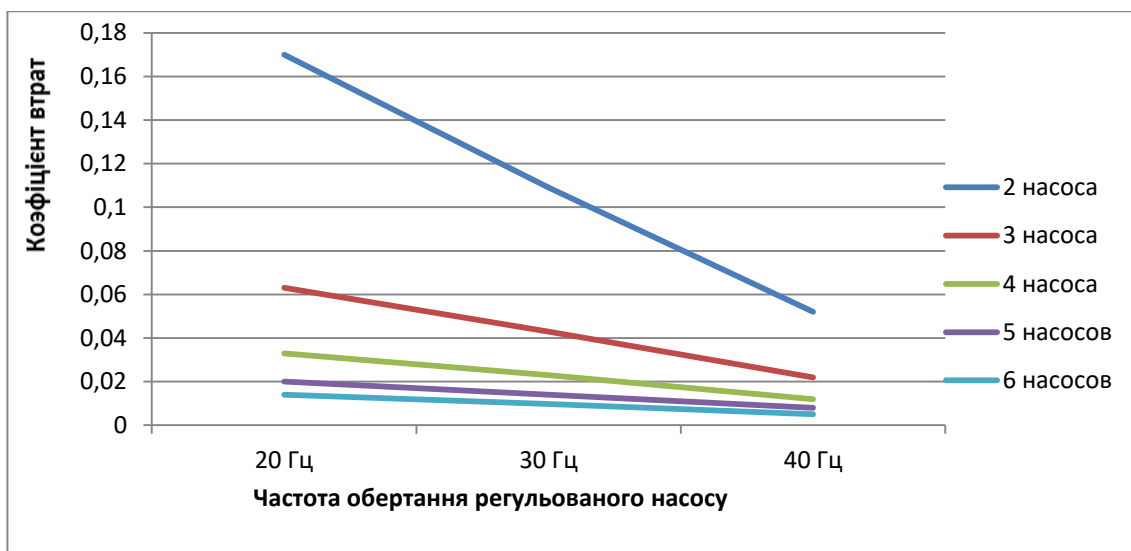


Рисунок 4.9 - Графік залежності коефіцієнту втрат від частоти обертання регульованого насосу.

З графіків на рис. 4.8 випливає, що найбільші втрати в системі спостерігаються у випадку, коли є два насоси, один з яких працює на максимальній продуктивності, а інший є регульованим.

На рис. 4.10 представлена залежність коефіцієнта втрат від співвідношення регульованих до нерегульованих насосів для різних частот обертання регульованого насоса. За опорні частоти взяті кутові швидкості обертання 20, 30 і 40 Гц.

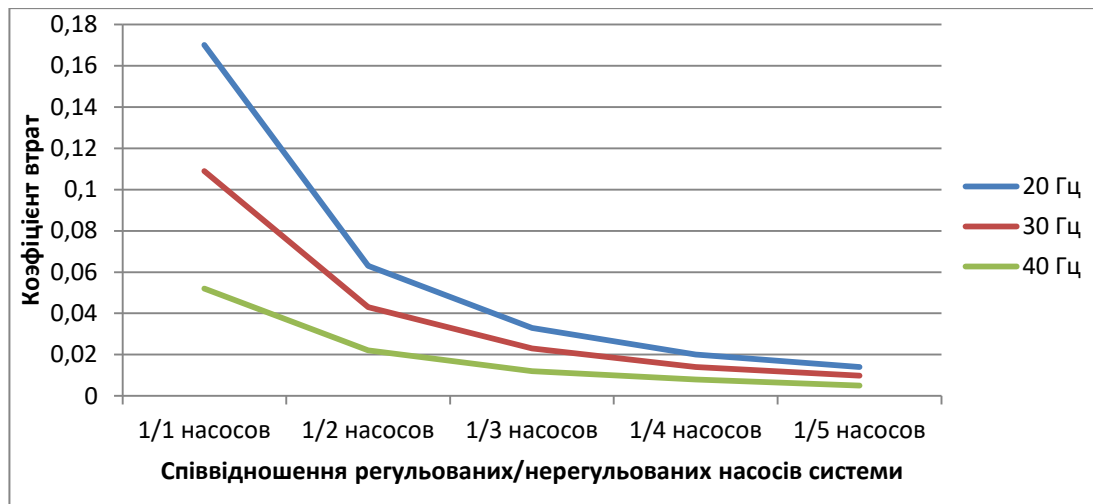


Рисунок 4.10 - Залежність коефіцієнта втрат від числа насосів при різній частоті обертання регульованого насоса.

З графіків на рис. 4.10 видно, що найменш ефективними є системи з двома насосами, зокрема тоді, коли один насос працює в режимі максимальної продуктивності, а інший є регульованим. З іншого боку, найбільш ефективними є системи з трьома і чотирма насосами, де один насос є регульованим.

Основним недоліком 5- і 6-насосних систем є зниження глибини регулювання, що призводить до збільшення кількості комутацій насосів. Крім того, зі збільшенням кількості нерегульованих насосів значно зростають енергетичні втрати системи через різницю параметрів насосів, які працюють в режимі максимальної продуктивності.

Отже, оптимальне співвідношення регульованих до нерегульованих насосів становить 1/2 або 1/3.

Проведені розрахунки демонструють, що зі збільшенням співвідношення регульованих до нерегульованих насосів спостерігається різке зростання втрат.

На рис. 4.11 наведені залежності втрат в системі при збільшенні числа регульованих насосів.

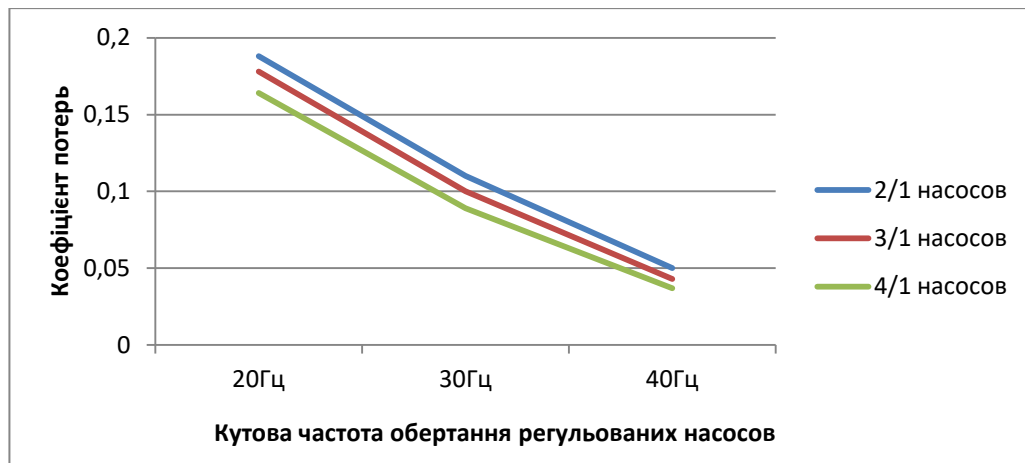


Рисунок 4.11 - Поведінка коефіцієнта втрат при збільшенні числа регульованих насосів.

Активна робота насоса визначає генеровану ним гідравлічну потужність. При вирівнюванні активних навантажень реактивні складові гідравлічної потужності, викликані їхнім небалансом, стають рівними нулю (рис. 4.7). Це спричиняє підвищення активних компонентів гідравлічних потужностей насосів, що веде до зростання активної гідравлічної потужності системи. Збільшення активної гідравлічної потужності призводить до збільшення тиску в точці регулювання в порівнянні із стабілізованим значенням, що веде до зниження середньої частоти. Таким чином, при зміні небалансу гідравлічних потужностей насосів збільшується коефіцієнт корисної дії системи як середнє значення коефіцієнта корисної дії насосів, що приводить до зниження її енергоспоживання при виконанні тієї ж роботи.

На рис. 4.12 наведено графік залежності коефіцієнта втрат у відключеному режимі вирівнювання навантажень від зміни середнього квадратичного відхилення частоти для трьох конфігурацій системи з трьома регульованими насосами з перетворювачами частоти при включенні режиму. Стани системи визначалися трьома заданими значеннями тиску в точці регулювання: 5,0; 5,5; 6,0 бар.

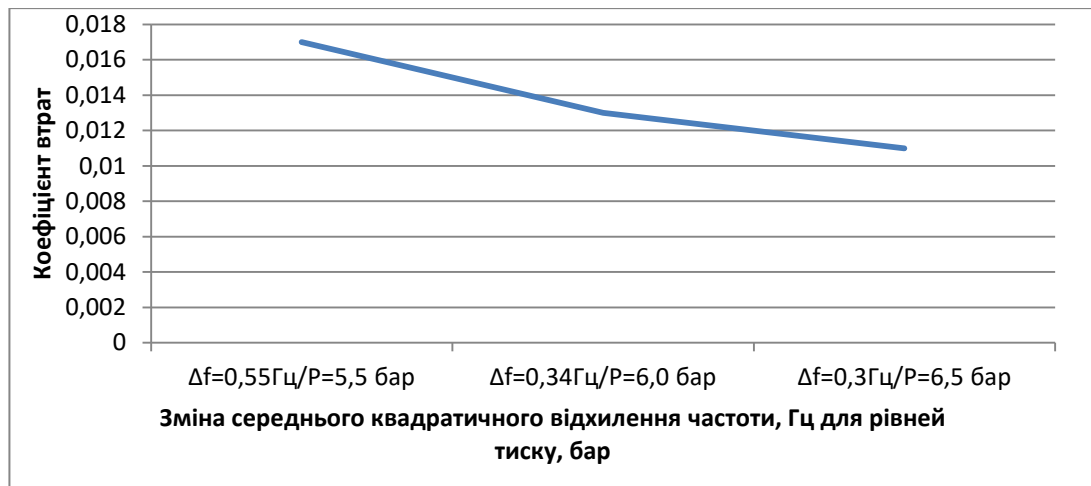


Рисунок 4.12 - Залежність коефіцієнта втрат від розрізнення частот обертання насосів.

Представлена на рис. 4.12 залежність свідчить, що навіть невелика зміна різниці частот обертання паралельно працюючих насосів (від 0,3 до 0,6 Гц) призводить до помітного (від 1,2-1,8%) збільшення енергетичних втрат в системі. Ці втрати, в кінцевому підсумку, призводять до додаткової витрати споживаної електроенергії.

Аналізуючі проведені розрахунки та отримані практичні результати, можна зробити наступні висновки:

1. При аналізі графіків паралельної роботи насосів (рис. 4.6) важливо враховувати енергетичні втрати в системі, що виникають внаслідок зниження частоти регульованого насоса. У цьому випадку графіки спільної роботи насосів (рис. 4.6), з урахуванням залежностей, представлених на рис. 4.13, набувають наступного вигляду:

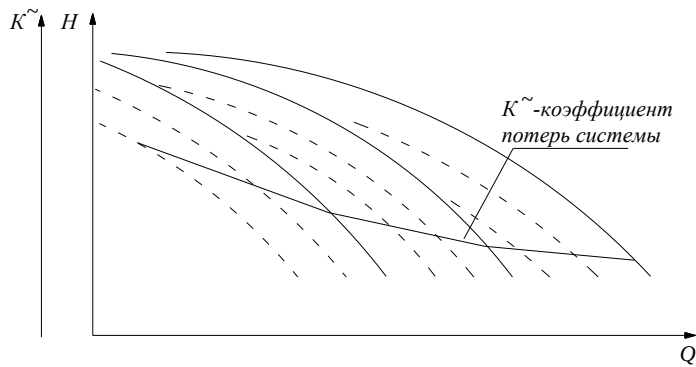


Рисунок 4.13 - Залежність коефіцієнта втрат від числа насосів та продуктивності регульованого насоса системи із трьох насосів.

2. У системах з двома насосами, один із яких регульований, а інший працює в режимі максимальної продуктивності, енергетичні втрати можуть складати до 18% загальної потужності системи. Для насосів із потужністю 250 кВт такі втрати, перераховані в енергетичні одиниці, становитимуть до 65 кВт·год.

3. В системах із одним регульованим насосом для зменшення енергетичних втрат треба уникати режимів роботи "один регульований / один нерегульований насос". Такий режим може становити не менше 70-80% часу функціонування системи з 3-4 насосами, де один із них є регульованим.

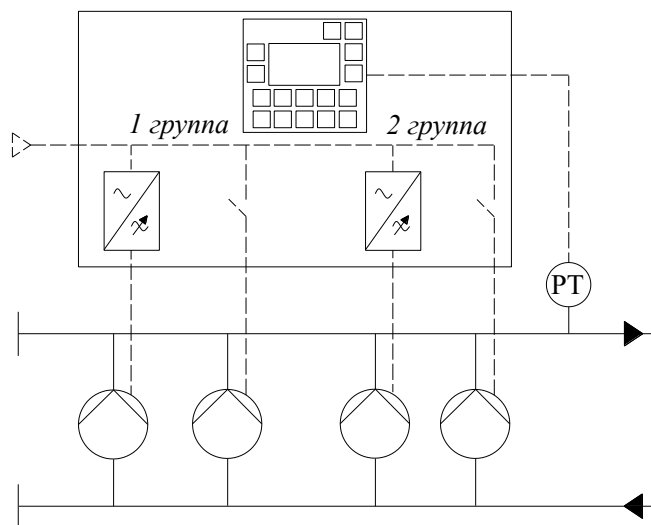


Рисунок 4.14 - Схема енергоефективної системи підвищення тиску

Система, представлена на рис. 4.14, складається з двох груп, кожна з яких включає два насоси. У кожній групі один насос піддається регулюванню, а інший працює в нерегульованому режимі. При використанні двох насосів управління виконується двома перетворювачами частоти. У випадку потреби підключення третього (чи четвертого) насоса один із перетворювачів частоти виводиться на режим максимальної продуктивності і працює в нерегульованому режимі. Таким чином, у системі з трьох чи чотирьох насосів один з них піддаваний регулюванню, а інші працюють в режимі повної продуктивності.

При відключенні третього і четвертого насосів перетворювач частоти, який раніше був переведений в режим максимальної продуктивності, знову переходить в режим регулювання. Таким чином, система виключає режим роботи двох насосів, де один є регульованим, а інший - нерегульованим.

Збільшення кількості насосів в групі, порушення рівноваги по кількості насосів в групі, а також збільшення кількості груп призведе до зниження ефективності системи при одночасному збільшенні її вартості.

У випадку систем із п'ятьма або шістьма насосами, час роботи в режимі "1/1" істотно скорочується, але при цьому загальні втрати збільшуються через небаланс потужностей насосів, які працюють в режимі максимальної продуктивності. Для таких систем раціональним вибором стає схема регулювання кожного насоса окремим перетворювачем частоти.

Запропонована структура системи підвищення тиску має кілька переваг. З одного боку, це сприяє уніфікації проектування систем, знижує витрати на виробництво і подальшу експлуатацію. З іншого боку, введення другого перетворювача частоти в схему управління підвищує надійність функції частотного регулювання, що може залишатися дієвою при відмові одного перетворювача або його тимчасовому виведенні з експлуатації для проведення профілактичних робіт.

Результати проведених розрахунків свідчать, що вартість устаткування з використанням другого перетворювача частоти в енергоефективній системі окупається завдяки додатковій економії електроенергії. Наприклад, для насосів з потужністю 30 кВт термін окупності становить від 1,2 до 1,8 року, для насосів з потужністю 132 кВт - від 1 до 1,6 року, залежно від типу встановленого перетворювача частоти. Важливо відзначити, що ресурс системи складає не менше 20 років. Зменшення витрат на електроенергію протягом цього періоду дозволить повністю окупити всю систему управління для трьох (чотирьох) насосів потужністю 30 кВт кожен принаймні двічі, і для насосів потужністю 132 кВт кожен - принаймні тричі.

4.3. Вибір оптимального варіанту конфігурації насосної станції.

Розглянемо варіанти конфігурації насосної станції при змінному графіку водоспоживання. Основні параметри насосної станції визначені в пункті 4.1. Для даного випадку вибрано насоси типу CRE від виробника GRUNDFOS. Відповідно до рекомендацій [2] здійснюємо аналіз чотирьох варіантів конфігурації насосної станції:

1. Один насос із регульованим електроприводом;
2. Один насос із регульованим електроприводом та один насос із нерегульованим електроприводом;
3. Один насос із регульованим електроприводом та два насоси із нерегульованим електроприводом;
4. Дві групи насосів: два насоси із регульованим електроприводом та два насоси із нерегульованим електроприводом.

Всі варіанти конфігурації насосної станції наведені на рисунку 4.15.

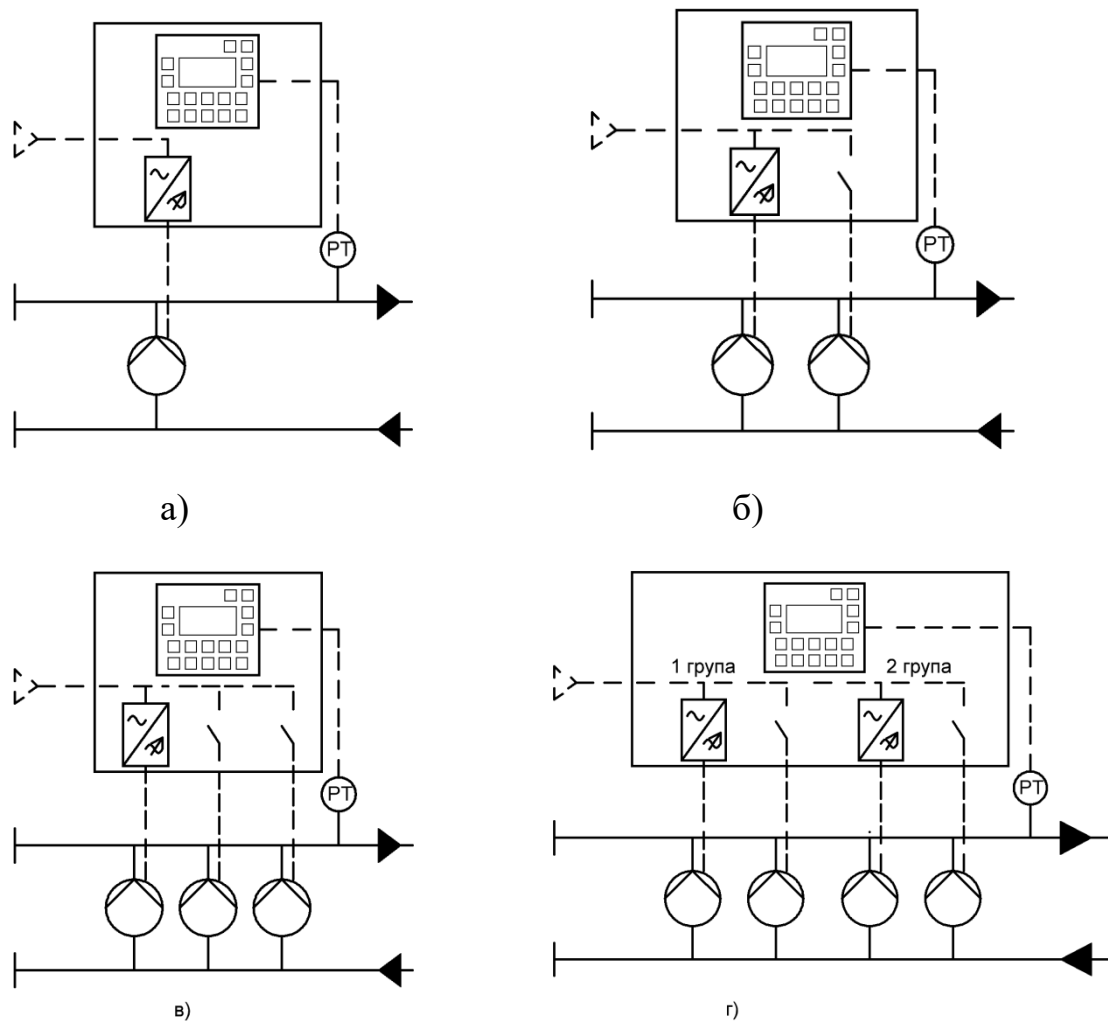


Рисунок 4.15 - Варіанти конфігурацій насосної станції: а) - один насос із регульованим електроприводом; б) - один насос із регульованим електроприводом і один насос із нерегульованим електроприводом; в) - один насос із регульованим електроприводом та два насоса із нерегульованим електроприводом; г) - дві групи насосів: два насоси із регульованим електроприводом і два насоси із нерегульованим електроприводом.

Для кожного варіанту конфігурації насосної станції визначаємо відповідні насосні агрегати.

Варіант №1.

Вибір насосного агрегату для забезпечення водопостачання включає визначення потужності, яку споживає насос при найбільшій подачі:

$$N_{\delta} = \frac{9,8 \cdot Q_{\delta} \cdot H_{\delta}}{\eta_n} = \frac{9,81 \cdot 0,028 \cdot 51}{0,733} = 18,96 \text{ кВт} \quad (4.13)$$

Потужність, кВт, яка споживається насосним агрегатом, обчислюється за формулою:

$$P = \frac{N}{\eta_{ED}} = \frac{18,96}{0,876} = 21,64 \text{ кВт} \quad (4.14)$$

Для розрахунку прогнозованої економії електроенергії при роботі насосної установки за розрахунковий період часу використовуємо спрощену методику, яка наведена в [13].

$$W_{ек} = \frac{N_B \cdot T}{\eta_{ED}} \cdot [w_{ек}^* - (1 + \zeta - \eta_{пр})] = \frac{18,96 \cdot 8760}{0,876} \cdot [0,426 - (1 + 0,02 - 0,97)] = 71289,606 \quad (4.15)$$

кВт · год / рік,

де N_B - потужність, яка споживається насосом при максимальній подачі, кВт;

$T=8760$ год – розрахунковий період;

$\eta_{ед}$ – номінальний ККД асинхронного двигуна;

$\eta_{пр}$ – номінальний ККД перетворювача частоти, $\eta_{пр} \approx 0,97-0,98$;

ζ – коефіцієнт, який враховує додаткові втрати в асинхронному двигуні, $\zeta=0,02-0,03$;

ϕ - понижуючий коефіцієнт, який враховує число насосів, вибирається за таблицею [3];

$w_{ек}$ – значення відносної прогнозованої економії електроенергії, обирається за розрахунковими кривими (рис.4.16):

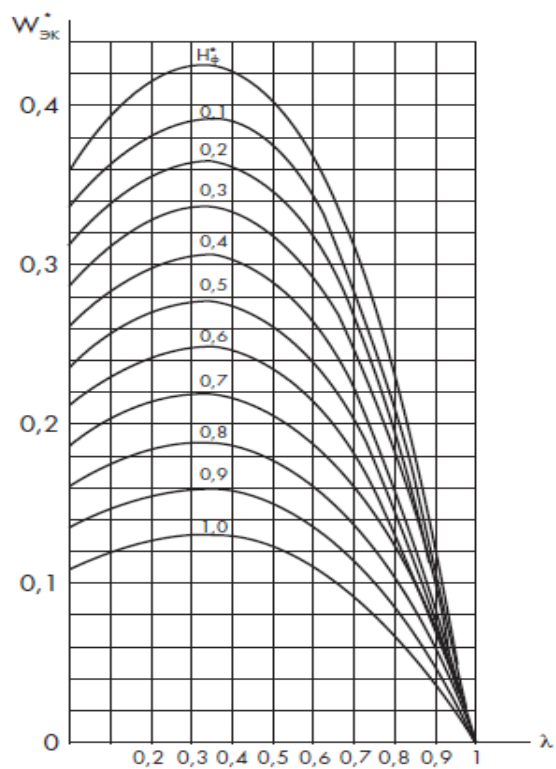


Рисунок 4.16 - Розрахункові криві для визначення значення відносної економії електроенергії.

Вибір насосних агрегатів та розрахунок економії електроенергії для інших варіантів проведено аналогічно та узагальнено в Таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 - Розрахунок економії електроенергії для інших варіантів конфігурації насосної станції.

Параметр	№1	№2	№3	№4
Число насосів	1	2	3	4
Тип насосів (GRUNDFOS)	CRE 90-2	CRE 32-5	CRE 32-4	CRE 32-3
Напруга, В	380-415 В	380-480 В	380-480 В	380-480 В
Параметри асинхронного двигуна	1х22 кВт	2х11 кВт	3х7,5 кВт	4х5,5 кВт
Витрати, м ³ /год	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>H</i> загальний, м	32,0	32,0	32,0	32,0
Потужність <i>P</i> ₁ , кВт	21,6	21,3	20,7	20,7
Потужність <i>N</i> , кВт	18,9	(2х9,24) 18,480	(3х5,89) 17,670 кВт	(4х4,38) 17,520
ККД насоса, %	73,3	75,20	78,60	79,40,
ККД асинхронного двигуна, %	87,6	86,90	85,5 0	84,80
ККД перетворювача частоти, %	97,0	97,0	97,0	97,0
Загальні витрати, м ³ /рік	546405,0	546405,0	546405,0	546405,0
Діапазон зміни подачі λ	0,4	0,380	0,380	0,380
Розрахунковий період <i>T</i> , год	8760,0	8760,0	8760,0	8760,0
Коефіцієнт, який враховує додаткові втрати в АД ζ	0,0	0,020	0,020	0,020
Понижуючий коефіцієнт, враховуючий число насосів φ	1,0	0,860	0,840	0,820
Відносна економія електричної енергії $w^*_{ек}$	0,4	0,4260	0,4260	0,4260
Прогнозована економія електричної енергії $W_{ек}$, кВт·год/рік	71289,6	60238,280	57082,590	55673,870
Питома вартість електричної енергії C_0 , грн/ кВт·год	2,7	2,7	2,7	2,7
Вартість заощадженої електроенергії, грн	192481,9	162643,4	154122,9	150319,4

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Організація та здійснення ремонтних заходів в електроустановках.

Організація та здійснення ремонтних заходів в електроуст.ановках включає в себе нижчеперелічені заходи.

1. Планування робіт:

- Розроблення детального плану ремонтних робіт, включаючи обсяг, послідовність та терміни виконання.
- Визначення необхідних ресурсів, інструментів та матеріалів.

2. Безпека:

- Забезпечення дотримання всіх стандартів та норм безпеки при роботі з електрообладнанням.
- Надання робочому персоналу відповідного захисту та інструкцій щодо безпеки.

3. Відключення та блокування:

- Відключення електроустановок від джерел живлення та блокування їх для уникнення випадкового включення під час ремонту.

4. Перевірка та діагностика:

- Проведення повного технічного обстеження обладнання для виявлення несправностей та потреб у ремонті.
- Визначення причин виникнення проблем та розроблення плану їх усунення.

5. Заміна та відновлення:

- Виконання необхідних робіт з заміни або відновлення пошкоджених частин чи елементів.
- Використання високоякісних матеріалів та запасних частин.

6. Тестування та налагодження:

- Проведення випробувань та тестів для перевірки правильності ремонтних робіт.
- Налагодження обладнання для оптимального функціонування.

7. Документація:

- Ведення детальної документації про проведені ремонтні роботи, включаючи замінені частини, використані матеріали та результати тестування.

8. Повторне включення:

- Здійснення контрольного включення обладнання, дотримуючись всіх необхідних процедур та перевірок безпеки.

9. Оцінка ефективності:

- Оцінка ефективності проведених ремонтних робіт та визначення подальших заходів для забезпечення надійності системи.

Інженерно-технічний, черговий та оперативно-ремонтний електротехнічний персонал відповідає за оперативне обслуговування електроустановок. Обов'язки чергового персоналу, пов'язані з конкретною електроустановкою, визначаються місцевими інструкціями. У цих інструкціях також мають бути викладені основні заходи з електробезпеки та пожежної безпеки, що стосуються використовуваного електрообладнання.

Оперативне обслуговування електроустановок може проводитися як однією, так і декількома особами. Кількість персоналу для кожного цеху, ділянки чи підстанції визначається головним енергетиком підприємства.

Під час утримання електроустановок з напругою понад 1000 В, відповідальність за це несе старший по зміні (бригадир) або черговий, обладнаний кваліфікаційною групою не нижче IV. Для електроустановок з напругою до 1000 В, відповідальний повинен мати не нижче III групи кваліфікації.

Забезпечення безпечного виконання робіт в електроустановках

здійснюється через організаційні заходи, такі як виписування наряду чи розпорядження, видача допуску робочим для проведення робіт, нагляд під час виконання, документування перерв у роботі та переходів бригади на інше місце, а також оформлення завершення робіт і закриття наряду.

Виписування наряду є обов'язковим для робіт, які виконуються з повним або частковим відключенням напруги в ремонтівній електроустановці, а також для робіт, які виконуються без відключення напруги поблизу або безпосередньо на елементах, що знаходяться під напругою. Ці види робіт, як правило, вимагають підготовки робочого місця та виконання необхідних технічних заходів для забезпечення їх безпечного виконання.

Організаційні заходи для забезпечення безпеки робіт, які здійснюються в ході поточної експлуатації, включають наступні етапи:

- Оператор, відповідальний за електрогосподарство підприємства, складає перелік робіт, враховуючи конкретні місцеві умови виробництва. Цей перелік підтверджується головним механіком підприємства.

- Виконавець робіт визначає необхідність проведення певних робіт і можливість їх безпечного виконання.

Ці роботи вважаються постійно дозволеними і не вимагають видавання будь-яких додаткових розпоряджень.

5.2. Заходи технічного характеру для забезпечення безпеки при експлуатації електроустановок на підприємстві.

Заходи технічного характеру для забезпечення безпеки при експлуатації електроустановок на підприємстві включають такі захисні заходи:

1. *Обмеження напруги.*

Якщо номінальна напруга електроустановки не перевищує допустимого рівня напруги при дотику, то навіть при одночасному контакті людини з провідними частинами різних фаз або полюсів буде забезпечена безпека. Контакт з однофазним доторканням до провідних частин або корпусу, який перебуває під напругою, навіть якщо не заземлений, буде безпечним завдяки визначенню струму через людину опором ізоляції та низькою напругою. Утім, в умовах вологих приміщень, де опір людини може бути значно знижений, струм, який протікає через людину при доторканні до двох виводів чи фаз, залишається неприпустимо великим. Таким чином, вживаються інші заходи забезпечення безпеки.

2. *Розділення електричних мереж.*

Великі розгалужені мережі значної протяжності мають велику ємність і низький активний опір ізоляції по відношенню до землі, що може призвести до значних струмів короткого замикання. Таким чином, однофазний контакт в такій мережі, навіть з ізольованою нейтраллю, є потенційно небезпечним. Розділяючи велику розгалужену мережу з великою ємністю та низьким опором ізоляції на кілька менших мереж приблизно однакової напруги, які характеризуються низькою ємністю та високим опором ізоляції, можна значно знизити ризик. Таким чином, струм через людину, що доторкнулася до одного фазного провідника, буде визначатися великим опором фази до землі. Наприклад, у мережах з напругою 380 В, якщо опір фази до землі є більшим за 63 кОм, а опір тіла людини $R_{ch} = 1,0$ кОм, струм через людину не перевищить 10 мА.

Зазвичай розділення електричних мереж здійснюється за допомогою підключення окремих електроприймачів через роздільний трансформатор, який живиться від основної мережі.

Важливим аспектом є безпека продовження роботи електроустановки при глухому короткому замиканні на землю, оскільки

людина, яка доторкнулася до функціональної фази, опиняється під лінійною напругою. Для уникнення небезпеки важливо постійно контролювати стан ізоляції.

3. *Моніторинг та попередження пошкоджень ізоляції.*

Приймально-здаточні випробування проводяться при введенні в експлуатацію нових електроустановок та тих, що були відремонтовані. Обсяг і норми таких випробувань регулюються Правилами внутрішньої електроустановки (ПУЕ) та правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС).

Періодичний контроль ізоляції включає вимірювання опору ізоляції при введенні електроустановки в експлуатацію після монтажу, регулярно, визначеними Правилами, або у випадку виявлення дефектів. Ці виміри проводяться при вимкненій установці. Опір ізоляції вимірюється для кожної фази на кожному відрізку між двома послідовно встановленими апаратами захисту чи за останнім захисним апаратом.

Для отримання повної інформації про опір ізоляції всієї мережі рекомендується проводити виміри під робочою напругою. Зазначений контроль можливий лише для мереж із ізольованою нейтраллю.

4. *Захист від випадкового контакту.*

Для ефективного уникнення можливості контакту та небезпечного наближення до струмоведучих частин на розглядуваному підприємстві застосовуються декілька заходів. Серед них важливі:

- Огородження. Застосовуються як цільні, так і сітчасті огороження для утруднення доступу до струмоведучих елементів.
- Розташування на висоті. Струмоведучі частини розміщуються на висоті, недоступній для небезпечного дотику.
- Електричне блокування. Використовується на кінцевих вимикачах або

герконах для додаткового узагальненого захисту.

- Подвійна ізоляція. Застосовується для запобігання дотику до частин, що можуть опинитися під напругою. Складається із робочого та додаткового шару ізоляції. Додатковий шар використовується для захисту від електричного ураження та може включати покриття ручок та інших частин обладнання електроізоляційним матеріалом та використання ізольованих рукояток.

5. *Захисне заземлення.*

Використання захисного заземлення в мережі зі заземленою нейтраллю та напругою до 1000 В є неефективним. Це пояснюється тим, що при глухому короткому замиканні на землю струм не залежить від опору заземлення, і зменшення опору призводить до збільшення струму. Таким чином, захисне заземлення використовується в основному у внутрішніх цехових мережах напругою 10 кВ з ізольованою нейтраллю.

6. *Занулення.*

Застосовується в чотирьохпроводних мережах з напругою до 1000 В, де нейтраль заземлена. З метою скорочення тривалості режиму короткого замикання на корпусі встановлюється нульовий провід, який з'єднується з заземленою нейтраллю джерела та повторними заземлювачами. При зануленні корпуси електрообладнання не з'єднуються з повторними заземлювачами, але з нульовим проводом. Занулення перетворює можливість короткого замикання на корпус електроприймача в однофазне коротке замикання, що активує відключення за допомогою МТЗ та селективно відмикає уражену ділянку мережі.

5. *Використання пристроїв захисного відключення.*

Захисне відключення – це швидкодіючий захист, який автоматично відключає електроустановку, якщо існує небезпека ураження людини електричним струмом. Така небезпека може виникнути у випадках, коли стається замикання фази на корпусі, опір ізоляції мережі падає нижче

визначеної межі, або коли людина безпосередньо торкається струмоведучої частини, що перебуває під напругою.

У всіх зазначених випадках небезпека ураження виникає через напругу дотику (U_{dom} , В) або, іншими словами, через струм, що проходить через людину (I_h , А). Як відомо,

$$U_{dom} = I_h \cdot R_h, \quad (5.1)$$

де R_h – опір тіла людини, Ом.

Отже, у випадку, коли напруга дотику (або струм через людину) при дотику до корпусу обладнання або фази мережі перевищує тривало допустиме значення, існує реальна загроза ураження людини електричним струмом. Єдиним ефективним заходом для захисту в цьому випадку є швидкий розрив ланцюга струму через людину, що включає відключення відповідної ділянки мережі. Для цієї задачі використовується захисне відключення.

Основними компонентами пристрою захисного відключення (ПЗВ) є прилад захисного відключення та автоматичний вимикач.

Прилад захисного відключення представляє собою комплекс окремих складових, які реагують на вхідну величину, роблять висновки при її зміні і, при досягненні визначеного порогового значення, ініціюють відключення вимикача. Основні елементи цього пристрою включають:

1) Датчик - це вхідний елемент, який сприймає зовнішній вплив і конвертує його в відповідний сигнал. Зазвичай це можуть бути реле відповідного типу, а іноді вимірювальні трансформатори, вхід підсилювача, струмові та напругові фільтри нульової послідовності тощо.

2) Підсилювач - відповідає за посилення сигналу від датчика, якщо виявляється, що він недостатньо потужний.

3) Ланцюги контролю - ці елементи відповідають за регулярну перевірку справності захисного відключення.

4) Допоміжні елементи - сюди входять сигнальні лампи і

вимірювальні прилади (наприклад, омметр), які характеризують стан електроустановки.

Принципові вимоги до ПЗВ включають:

- чутливість;
- короткий час відключення;
- селективність дії ПЗВ;
- здійснення самодіагностики;
- висока надійність.

Чутливість ПЗВ є ключовою характеристикою, оскільки вона визначає її здатність реагувати на навіть невеликі зміни вхідних величин, що може викликати небезпеку. Високочутливі пристрої можуть бути налаштовані на спрацьовування при найменших ознаках небезпеки, забезпечуючи високий рівень безпеки для людей та обладнання.

Однак такі пристрої можуть бути більш складні в експлуатації і коштовнішими в порівнянні з менш чутливими аналогами. Важливо знаходити оптимальний баланс між чутливістю, вартістю та іншими характеристиками для забезпечення ефективного та економічного захисту.

Час відключення в електричних системах визначається як сума часу дії захисту (t_3) і часу дії комутуючого апарата (t_6). Математично це може бути виражено так:

$$\text{Час відключення } t_{\text{відкл}} = t_3 + t_6$$

де:

- t_3 - час дії захисту (визначає, як швидко захист реагує на аварійну ситуацію і вимикає ланцюг струму);
- t_6 - час дії комутуючого апарата (час, необхідний для вимикання струму комутуючим апаратом після того, як захист вже виявив аварійну ситуацію).

Ця сума визначає загальний час, за який ланцюг струму буде відключено після виникнення аварійної ситуації.

Так, існуючі конструкції приладів і апаратів, які використовуються в

схемах захисного відключення, можуть забезпечувати дуже короткий час відключення $t_{відкл}$, зазвичай від 0,05 до 0,2 секунд. Це важливо для швидкого вимкнення електричної системи в разі виникнення аварійної ситуації, щоб максимально зменшити час можливого впливу небезпечного струму на систему чи обладнання.

Ці прилади використовуються для надійного та швидкого реагування на різні аварійні умови, такі як коротке замикання, перевантаження чи інші несправності в електричних мережах. Швидке відключення може значно знизити ризик ураження людини струмом та мінімізувати можливість пошкодження обладнання.

Точний час відключення може залежати від типу захисного пристрою та його конструкції, а також від конкретних вимог безпеки для конкретного застосування.

5.3. Заходи технічного характеру для забезпечення безпеки при експлуатації асинхронних двигунів на підприємстві.

До таких заходів відносяться:

Системи захисту і контролю.

Встановлення систем, що моніторять робочі параметри асинхронних двигунів, такі як температура, струм, напруга, та надають можливість оперативно виявляти аномалії.

- Термічний захист. Використання термічних датчиків, які виявляють перегрів двигуна. У випадку виявлення надмірного нагрівання, система автоматично відключає двигун для запобігання пошкодженню.
- Захист від перевантаження. Встановлення пристроїв, що автоматично відключають двигун при перевищенні встановлених лімітів навантаження, захищаючи його від перевантаження.
- Автоматичний контроль над напругою і частотою. Системи, які

регулюють напругу та частоту подачі живлення, щоб утримувати їх на оптимальному рівні для асинхронного двигуна.

- Виявлення втрати фаз. Датчики, які виявляють втрату однієї з фаз живлення та автоматично відключають двигун для запобігання ураженню чи пошкодженню.
- Системи автоматичного відключення в разі несправності.

Автоматичне відключення двигуна у випадку виявлення несправності або інших аварійних ситуацій для запобігання подальшим проблемам.

Ці системи забезпечують надійний захист та ефективний контроль за роботою асинхронних двигунів у різних умовах експлуатації.

Термічний захист.

Використання термічних датчиків та пристроїв для виявлення перегріву асинхронних двигунів і автоматичного відключення їх в разі небезпеки.

Термічний захист асинхронних двигунів – це система, спрямована на запобігання перегріву двигуна та захист його від можливих пошкоджень. Цей вид захисту є важливою складовою систем безпеки та надійності експлуатації асинхронних двигунів. Основні аспекти термічного захисту включають:

- Термічні датчики, які вимірюють температуру двигуна під час його роботи. Ці датчики можуть бути розташовані в різних частинах двигуна, таких як обмотки статора або обгортка.
- Автоматичне відключення при перегріві. Якщо температура двигуна перевищує заданий ліміт, система автоматично відключає подачу живлення до двигуна. Це запобігає подальшому перегріву та можливим пошкодженням.
- Індикатор температури або сигналізація, які інформують оператора про підняття температури та можливий ризик перегріву.

- Автоматичний перезапуск після охолодження, тобто, система може автоматично відновити подачу живлення, коли температура двигуна знизиться до безпечних значень.
- Регулювання швидкості вентилятора охолодження, встановлення систем, які регулюють швидкість обертання вентилятора охолодження в залежності від температури, забезпечуючи ефективне охолодження.
- Заходи попередження для попередження перегріву, таких як системи автоматичного регулювання навантаження чи обмеження стартів.

Термічний захист є ключовим елементом для збереження ефективності та тривалості роботи асинхронних двигунів, а також для уникнення серйозних пошкоджень через перегрів.

Автоматичні пристрої вимірювання і захисту від перевантаження.

Передбачено встановлення систем, що вимірюють навантаження та автоматично вимикають двигуни в разі перевищення заданих лімітів.

Автоматичні пристрої вимірювання і захисту від перевантаження представляють собою системи, які спроектовані для виявлення та реагування на перевищення встановлених лімітів навантаження. Ці пристрої грають важливу роль в забезпеченні безпеки та надійності роботи різноманітних технічних систем, включаючи електричні.

Основні характеристики автоматичних пристроїв вимірювання і захисту від перевантаження включають:

- Використання спеціальних сенсорів і датчиків, які моніторять струм, напругу, або інші параметри, що вказують на рівень навантаження.
- Система автоматично відключає або обмежує подачу енергії в разі виявлення перевантаження, запобігаючи пошкодженню обладнання та подальших проблем.

- Можливість програмування параметрів, таких як максимальний допустимий струм чи потужність, відповідно до вимог технічної системи.
- Включення індикаторів або сигналізаційних пристроїв для інформування операторів про виникнення перевантаження та подачі сигналів про необхідність втручання.
- В разі відключення через перевантаження, можливість автоматичного відновлення подачі енергії після зниження навантаження до безпечного рівня.
- Деякі пристрої можуть включати захист від короткого замикання, щоб додатково захистити систему.

Ці автоматичні пристрої використовуються для попередження перевантаження, яке може призвести до пошкодження обладнання та негативно вплинути на ефективність технічних систем.

Системи ізоляції та заземлення

Забезпечення ефективної системи ізоляції та заземлення для запобігання ураженню електричним струмом під час експлуатації.

Системи ізоляції та заземлення в електричних системах є критичними для забезпечення безпеки та надійності. Основні аспекти цих систем включають:

- 1) Заземлення обладнання - з'єднання обладнання із землею для створення ефективного шляху струму, що забезпечує виведення електричного струму в землю в разі виникнення несправностей.
- 2) Заземлення струмовідводів - заземлення металевих струмовідводів та інших металевих елементів системи для ефективної відведення блискавкового струму в землю.
- 3) Заземлення корпусів обладнання - з'єднання металевих частин обладнання із заземленням для захисту від непередбачених струмів та уникнення ураження користувачів.

4) Ізоляція провідників - використання ізоляційних матеріалів для обгортання провідників, щоб уникнути коротких замикань та зменшити ризик ураження струмом.

5) Моніторинг системи заземлення - встановлення систем моніторингу, які періодично перевіряють ефективність заземлення та сповіщають про можливі проблеми.

6) Дворівнева заземлення - застосування дворівневого (двополюсного) заземлення для забезпечення додаткового рівня безпеки в електроустановках.

7) Заходи для попередження статичної електрики - використання ізоляційних матеріалів та розвідки для уникнення накопичення статичної електрики та її впливу на обладнання.

Ці системи взаємодіють для зменшення ризиків ураження струмом, перешкоджаючи коротким замиканням, забезпечуючи ефективне відведення блискавкового струму та забезпечуючи надійність електричних систем.

Регулятори напруги і частоти.

Встановлення регуляторів, які утримують стабільні значення напруги та частоти живлення для оптимальної роботи асинхронних двигунів.

Регулятори напруги і частоти в електричних системах відповідають за збереження стабільності цих параметрів для забезпечення нормального функціонування обладнання. Основні аспекти цих регуляторів включають:

- Регулювання напруги забезпечується, щоб рівень напруги залишався в межах допустимих значень.

- Регулювання частоти забезпечується, щоб частота залишалася в заданих рамках, наприклад, 50 Гц чи 60 Гц, в залежності від стандартів країни.

- Автоматична корекція змін навантаження адаптує рівень напруги та частоти відповідно до змін у навантаженні, забезпечуючи стабільність при

зміні обсягу використовуваної електроенергії.

- Захист від перенапруги та перевантаження, щоб запобігти пошкодженню обладнання.
- Системи реакції на аварії забезпечують швидку реакцію на події.
- Моніторинг параметрів мережі, встановлення систем, які постійно моніторять параметри мережі і сповіщають операторів про будь-які зміни чи аномалії.

Ці регулятори грають ключову роль у забезпеченні стабільності та ефективності електричних систем, контролюючи та регулюючи напругу та частоту в реальному часі.

Системи автоматичного відключення в разі втрати фаз.

Додавання пристроїв, які автоматично відключають асинхронні двигуни в разі втрати однієї з фаз, щоб уникнути непередбачених ситуацій.

Системи автоматичного відключення в разі втрати фаз в електричних системах призначені для реагування на неправильну роботу фаз та автоматичного відключення обладнання в разі виявлення проблем. Основні характеристики цих систем включають:

- Виявлення втрати фаз виконують датчики ізоляції чи інші засоби для виявлення втрати однієї з трьох фаз системи.
- Система автоматично відключає обладнання від електричної мережі в разі виявлення втрати фази для уникнення подальших пошкоджень та забезпечення безпеки.
- Перевірка та відключення обладнання у випадку втрати фази для запобігання перевантаженню та його подальшому пошкодженню.
- Включення сигналізаційних пристроїв або індикаторів, які інформують операторів про втрату фази та відключення обладнання.

– У деяких випадках, системи можуть включати функції автоматичного відновлення після відновлення нормального електропостачання.

– Деякі системи можуть спочатку надсилати попередження чи сигнали про можливу втрату фази, перед тим як відключити обладнання.

Ці системи допомагають уникнути ризиків, пов'язаних із втратою фази, таких як неправильна робота обладнання, перевантаження та можливі пошкодження, що можуть виникнути при таких умовах.

5.4. Основні вимоги безпеки при експлуатації насосних станцій.

Насосні станції, які відповідають за системи водопостачання та каналізації, повинні гарантувати надійне та безперебійне постачання води для споживачів та перекачування стічних вод. Під час експлуатації цих насосних станцій обов'язки персоналу включають:

- Здійснення технічно правильного та безпечного керування роботою.
- Забезпечення постійного спостереження і контролю за станом та режимом роботи агрегатів, комунікацій та допоміжного обладнання.
- Підтримання належного санітарного стану у приміщенні.
- Ведення систематичного обліку та реєстрація відповідних записів у журналах експлуатації.
- Забезпечення своєчасного проведення ревізій устаткування та його регламентованого обслуговування.

На кожній станції для насосів устаткування має бути призначене для відповідних виробничих цехів (ділянок, служб) з чітко визначеними обов'язками підрозділів та відповідальністю персоналу за експлуатацію. Прив'язка устаткування фіксується наказом на підприємстві.

На станціях для перекачування рідин має зберігатися така технічна документація:

- Повний план території з позначеними підземними комунікаціями та пристроями.
- Оперативна технологічна схема комунікації, перемикання і агрегатів.
- Схема електропостачання, принципові та монтажні схеми автоматики та телемеханіки.
- Журнал контролю і обліку роботи устаткування.

Інструкції щодо експлуатації насосних станцій розробляються на основі "Правил технічної експлуатації систем водопостачання та водовідведення населених місць", інструкцій обладнання відповідних заводів-виробників, з урахуванням особливостей конкретної станції. У цих інструкціях визначаються умови:

- Організації функціонування насосної станції в нормальному режимі.
- Роботи насосної станції в нештатному режимі.
- Профілактичного та будь-яких інших видів ремонту обладнання.
- Експлуатації контрольно-вимірювального устаткування та систем вентиляції.
- Опалення, вантажопідйомного та іншого обладнання.

В інструкціях слід чітко визначити обов'язки суміжних структурних підрозділів з утримання, технічного обслуговування та ремонту обладнання, а також експлуатаційного персоналу. Для обслуговуючого персоналу насосної станції по кожній професії (крім того) повинні існувати інструкції з охорони праці.

В інструкціях щодо експлуатації має бути відображена послідовність операцій при запуску, перемиканні та зупинці насосних агрегатів та допоміжного обладнання, допустимі температури підшипників, максимальний тиск масла, перелік основних несправностей в насосному обладнанні і методи їх усунення.

У випадку виявлення таких несправностей в насосних агрегатах слід негайно припинити їх роботу:

- стукіт, який чути в агрегаті;
- іскріння і світіння в зазорі між статором і ротором електродвигуна;
- значне збільшення вібрації порівняно з нормальним режимом роботи;
- підвищення температури підшипників, обмоток статора або ротора електродвигуна понад допустимі значення;
- підпалення підшипників ковзання або виходження з ладу підшипників кочення;
- падіння тиску масла нижче допустимого рівня.

У разі аварійної зупинки насосного агрегату, обов'язково відразу повідомте диспетчера або відповідного керівника. У машинних залах насосних станцій передбачено монтажний майданчик для ремонту обладнання та окремий майданчик для обслуговування та ремонту вантажопідіймальних механізмів. Розміри монтажного майданчика повинні гарантувати простір шириною 0,7 м навколо встановленого на ньому обладнання.

Підлогу на станції облаштовують із нахилом у бік приямку для відведення води.

У випадку, коли висота агрегатів та електроприводів засувки перевищує 1,4 м від підлоги, необхідно встановлювати спеціальні майданчики, містки або розширювати фундамент для забезпечення їх обслуговування, огорожуючи їх огорожами.

Крім освітлення для роботи, в насосних станціях також слід передбачити систему аварійного освітлення.

Під час роботи насосних і компресорних установок заборонено відсунути запобіжні кожухи та інші захисні пристрої, використовувати відкритий вогонь для підігріву маслопроводів, освітлювати робоче місце

смолоскипами, виконувати ремонт агрегатів під час їх роботи та використовувати ручне гальмування рухомих частин.

При змінній роботі машиніст може завершити свою зміну лише після того, як працівник, що його замінює, прийме обслуговування агрегатами. Якщо машиністу потрібно тимчасово відійти під час зміни, його має тимчасово замінити інший працівник, який має достатні знання щодо роботи з агрегатами.

Насосні станції водопостачання. Станції водопостачання повинні бути розроблені з урахуванням можливості управління без постійного обслуговуючого персоналу. Управління може бути автоматичним, залежно від технологічних параметрів, таких як рівень води в ємностях, тиск або витрата води в мережі. Також може бути застосоване дистанційне (телемеханічне) управління з пункту управління. В інших випадках може бути використане місцеве управління з персоналом, який періодично відвідує станцію і передає необхідні сигнали на пункт управління або пункт із постійною присутністю обслуговуючого персоналу. У разі автоматичного або дистанційного управління також слід передбачити можливість місцевого управління.

У випадку аварійного відключення робочих насосних агрегатів у автоматизованих насосних станціях, автоматично повинно відбутися включення резервного агрегату.

Розподільні пристрої, трансформаторні підстанції та щити управління рекомендується розташовувати вбудованими або прибудованими приміщеннями з урахуванням можливості їхнього розширення та збільшення потужності. Також можливим є варіант окремого розташування закритих розподільчих пристроїв і трансформаторних підстанцій.

При встановленні закритих щитів у виробничих приміщеннях на балконах, необхідно вживати заходів, щоб уникнути потрапляння води на них.

Запірна арматура на всмоктувальних і напірних трубопроводах повинна бути розміщена таким чином, щоб забезпечити зручність заміни або ремонту будь-якого із зворотних клапанів та основної запірної арматури.

Кожна напірна лінія насоса має бути оснащена запірною арматурою і, як правило, зворотнім клапаном, розташованим між насосом і запірною арматурою.

У насосних станціях, які знаходяться в заглиблених або напівзаглиблених приміщеннях, слід прийняти заходи для захисту агрегатів в разі аварії у машинному залі. Це можна забезпечити розташуванням електродвигунів насосів на висоті не менше 0,5 м від підлоги, використанням самопливного випуску для відведення аварійної води в каналізацію та організацією відкачування води в прямку основними насосами виробничого призначення.

Якщо потрібно встановити аварійні насоси, їх продуктивність слід визначати з умови відкачування води з машинного залу при рівні 0,5 м протягом не більше 2 годин і передбачати наявність одного резервного агрегату. У насосній станції, незалежно від ступеня автоматизації, повинен бути обладнаний санітарний вузол (унітаз і раковина), а також приміщення та шафа для зберігання одягу експлуатаційного персоналу.

Якщо насосна станція розташована на відстані не більше 50 м від виробничих будівель, де вже є санітарно-побутові приміщення, тоді можна відмовитися від окремого санітарного вузла в насосній станції.

В окремо розташованій насосній станції для проведення дрібного ремонту слід передбачити установку верстата.

У насосних станціях необхідно встановлювати контрольно-вимірювальну апаратуру.

Приміщення для чергового персоналу насосної станції повинно бути обладнане засобами зв'язку (телефон, радіо).

Люки-лази повинні розташовуватися поблизу від кінців підвідного-відвідного та переливного трубопроводів. Кришки люків на резервуарах для питної води повинні мати пристрої для замикання і пломбування. Люки резервуарів мають підніматися над утепленням перекриття на висоту менше 0,2 м.

В резервуарах для питної води треба мати повну герметизацію всіх люків. В приміщенні для приготування розчину хлорного заліза, окрім загальнообмінної вентиляції, слід передбачити спеціальний пристрій для відсмоктування повітря з боксу, де миють хлорне залізо з тари.

Також у приміщенні, де готують розчин фтористого натрію, окрім загальнообмінної вентиляції, повинен бути встановлений пристрій для відсмоктування повітря з укриття для розтарування бочок із фтористим натрієм. У робочих прорізах повітря повинна рухатися зі швидкістю не менше 0,5 м/с.

Протипожежний захист

Пожежі в насосних станціях можуть виникати з різних причин, включаючи:

- Неправильне влаштування та експлуатація основного та допоміжного обладнання.
- Несправність електрообладнання, електропроводів (короткі замикання), освітлювальних приладів та порушення правил їхньої експлуатації.
- Самозагоряння мастильних матеріалів на промасленому спецодязі, смітті або інших легкозаймистих матеріалах при порушенні умов їх зберігання.
- Порушення правил проведення зварювальних та вогневих робіт у місцях зберігання горючих матеріалів та речовин.
- Поломка автоматичних пристроїв.
- Куріння та викидання недопалків і сірників.

– Неправильне розташування засобів захисту від статичної електрики та від атмосферних розрядів.

При експлуатації і ремонті обладнання насосної станції необхідно дотримуватись типових правил пожежної безпеки для промислових підприємств та правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі розглядались шляхи оптимізації енергоефективності та експлуатаційної надійності асинхронних електроприводів насосних установок

Важливість надійності роботи асинхронних двигунів у системах водопостачання важко переоцінити, оскільки це безпосередньо впливає на нормальне функціонування і надійність систем. Надійність роботи двигунів важлива для забезпечення ефективної експлуатації системи водопостачання та мінімізації витрат енергії.

В роботі був проведений аналіз режимів роботи насосних установок з метою визначення ключових параметрів, необхідних для розробки систем оптимізації, автоматизованого управління та виконання техніко-економічних розрахунків.

На сьогодні існують різноманітні засоби керування електродвигунами насосів, які враховують особливості навантаження і відповідають вимогам технічного прогресу. Ці засоби спрямовані на автоматизацію процесу управління, діагностику обладнання та надання інформації про технічний стан електродвигуна і насоса.

До основних переваг оптимізації та підвищення надійності асинхронних двигунів відносяться:

Асинхронні двигуни використовуються для приводу насосів у водопостачальних системах. Їхні неперервний та надійний робочий режим визначає постійну доступність води для споживачів.

Покращення експлуатаційних параметрів асинхронних двигунів приводить до того, що в надійних системах водопостачання мінімізується ризик аварій та виникнення ситуацій безводдя, що може призвести до негативних наслідків для населення та підприємств.

Непередбачувані поломки асинхронних двигунів можуть призвести до простоїв, що в свою чергу призводить до невдоволення споживачів і може мати економічні втрати. Заходи, направлені на покращення роботи електродвигунів мінімізують вірогідність поломок, аварій та виходу з ладу двигунів.

При впровадженні методів та засобів підвищення надійності асинхронних двигунів спостерігається тенденція на зменшення обслуговування та ремонту, що веде до зниження загальних витрат експлуатації системи.

Загально кажучи, надійність асинхронних двигунів у водопостачальних системах є важливою для забезпечення стабільності та безперебійності подачі води.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Мошноріз М. Вдосконалення роботи насосної станції водопостачання / Микола Мошноріз, Володимир Грабко // Автоматика–2006: міжнар. наук.-техн. конф., 25–28 вересня 2006 р. : тези доповідей. – Вінниця, 2006. – С. 124.
3. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
4. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Монографія / Загірняк М.В., Клепиков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. – Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2018. – 310 с.
5. Мошноріз М.М. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання: Дис. канд. техн. наук: 05.09.03. – Вінниця: ВНТУ, 2001. – 139 с.
6. Пат. 39795 Україна, МПК G 07 C 3/00. Пристрій керування запуском насосного агрегата / Грабко В. В., Мошноріз М. М.; заявник і патентотримач Вінницький національний технічний університет. – № U200812464; заявл. 23.10.08 ; опубл. 10.03.09, Бюл. № 5.
7. Екстремальні енергозберігаючі електромеханічні системи з асинхронним електроприводом / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. В.

Ковальчук, О. І. Кіселичник // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2001. – Вип. 10. – С. 314–318.

8. Особливості організації екстремальних енергозберігаючих систем при різних методах керування асинхронних електроприводів / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. І. Кіселичник, О. В. Ковальчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – Вип. 1 (12). – С. 129–132.

9. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи : навч. посібн. / Казачковський М. М. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 226 с

10. Мошноріз М. Оптимізація режимів роботи насосної станції водопостачання / Микола Мошноріз, Георгій Горячев // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації : Всеукраїнська наук.-техн. конф. молодих вчених і спеціалістів, 19–21 квітня 2006 р. : тези доповідей. – К., 2006. – С. 35.

11. Мошноріз М. Вдосконалення роботи насосної станції водопостачання / Микола Мошноріз, Володимир Грабко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – №6. – С. 138–141.

12. Мошноріз М. М. Визначення оптимального співвідношення продуктивностей насосних агрегатів станції для забезпечення їх сумісної роботи / М. М. Мошноріз // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 69–73.

13. Регульований електропривод: Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.: іл.