

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

“ ____ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему:

**«Аналіз та формування енергоефективної структури
насосної станції»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи *ЕЕ-23М*

ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,

_____Ростислав ШАПОВАЛОВ

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____Наталія ГАРАСЬОВА

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

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 Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

Петро ПЛЕСКОВ

« 04 » 10 2024 р.

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

Шаповалова Ростислава Миколайовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Аналіз та формування енергоефективної структури насосної станції

Analysis and development of an energy-efficient pumping station structure

2. Керівник роботи Гарасьова Наталія Юріївна, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 30.11.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи огляд режимів роботи насосних агрегатів систем водопостачання; керування продуктивністю насосної станції при сумісній роботі насосних установок; формування та розрахунок енергоефективної структури насосної станції; моделювання режимів роботи насосної установки з регульованим електроприводом; охорона праці при експлуатації насосних станцій; висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	04.10.2024 р.	
2	Огляд режимів роботи насосних агрегатів систем водопостачання	07.10.2024 р.	
3	Керування продуктивністю насосної станції при сумісній роботі насосних установок	17.10.2024 р.	
4	Формування та розрахунок енергоефективної структури насосної станції	31.10.2024 р.	
5	Моделювання режимів роботи насосної установки з регульованим електроприводом	07.11.2024 р.	
6	Охорона праці при експлуатації насосних станцій	17.11.2024 р.	
7	Висновки, список використаних джерел	21.11.2024 р.	
8	Оформлення презентації МР	27.11.2024 р.	
9	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки МР	30.11.2024 р.	

Дата видачі завдання _____ «____» _____ 2024 р.

Підпис керівника _____ Наталія ГАРАСЬОВА

Завдання прийнято до виконання _____ «____» _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____ Ростислав ШАПОВАЛОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 105 с.; 54 рис.; 22 табл.; 34 джерела

Шаповалов Р. М. Аналіз та формування енергоефективної структури насосної станції. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

Об'єктом досліджень є процеси функціонування насосної станції в системі водопостачання.

Предмет досліджень виступають методи підвищення енергоефективності насосних агрегатів за рахунок вибору їх оптимальної конфігурації, режимів роботи та використання частотного регулювання.

Метою роботи являється дослідження та формування енергоефективної структури насосної станції, спрямованої на оптимізацію її функціонування з мінімальним використанням електроенергії.

Перша та друга глави кваліфікаційної роботи присвячені аналізу режимів роботи НУ, керуванню їх продуктивності в залежності від типу насосної станції та виду обладнання. У третій главі здійснюється вибір та розрахунок варіантів конфігурації насосної станції, визначається їх економічна ефективність. В четвертій главі проводиться імітаційне моделювання режимів роботи насосної станції. В останній главі приведено заходи з охорони праці при роботі насосних установок. Доведено, що для формування енергоефективної системи НС необхідно здійснити детальний аналіз її технологічних параметрів, обрати оптимальну потужність і кількість насосів та перетворювачів, а також вибрати систему керування, яка забезпечить енергоефективний режим роботи насосної установки.

Ключові слова: насосна установка, режими роботи, частотне регулювання, комп'ютерна модель, підвищення енергоефективності

ABSTRACT

Qualification work: 100 p.; 54 fig.; 22 tables; 34 sources

Shapovalov R. M. Analysis and development of an energy-efficient pumping station structure. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrotechnical systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The object of research is the functioning processes of the pumping station in the water supply system.

The subject of research are methods of increasing the energy efficiency of pump units by choosing their optimal configuration, operating modes and using frequency regulation.

The aim of the work is research and formation of an energy-efficient structure of a pumping station aimed at optimizing its functioning with minimal use of electricity.

The first and second chapters of the qualification work are devoted to the analysis of operating modes of the NU, managing their performance depending on the type of pumping station and type of equipment. In the third chapter, the selection and calculation of options for the configuration of the pumping station is carried out, and their economic efficiency increases. In the fourth chapter of this period, simulation modeling of the operation modes of the pumping station. In the last chapter, labor protection measures during the operation of pumping units are given. It has been proven that in order to form an energy-efficient emergency system, it is necessary to carry out a detailed analysis of its technological parameters, choose the optimal power and number of pumps and converters, as well as choose a control system that will ensure the energy-efficient mode of operation of the pump installation.

Key words: pump installation, operating modes, frequency regulation, computer model, energy efficiency improvement

З М І С Т

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ОГЛЯД РЕЖИМІВ РОБОТИ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ.....	11
1.1 Сучасні насосні станції систем водопостачання. Різновиди та характеристика.....	11
1.2 Аналіз режимів роботи насосних установок.....	15
1.3 Керування продуктивністю насосної установки зміною частоти обертання.....	20
2 КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ПРИ СУМІСНІЙ РОБОТІ НАСОСНИХ УСТАНОВОК.....	27
2.1 Загальні положення сумісної роботи насосних агрегатів.....	27
2.2 Регулювання продуктивності насосної станції зміною кількості працюючих насосів.....	29
2.3 Паралельна робота насосних агрегатів з регульованим електроприводом.....	38
3 ФОРМУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СТРУКТУРИ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ.....	43
3.1 Визначення основних параметрів роботи насосних станцій та варіантів сумісної роботи насосів.....	43
3.2. Апроксимація напірних характеристик насосів.....	52
3.3 Робота окремого насоса з регульованим електроприводом на гідромережу.....	54
3.4 Сумісна робота регульованого та нерегульованого насосів на гідромережу.....	58
3.5 Оцінка економічної ефективності запропонованих варіантів конфігурації насосної станції.....	61

4	МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	70
4.1	Регулювання рівню напору в магістралі НС.....	70
4.2	Комп'ютерні імітаційні моделі елементів структурної схеми САК.....	71
4.3	Синтез САК напором в магістралі насосної станції.....	76
4.4	Імітаційна модель паралельної роботи насосних агрегатів на мережу споживача.....	79
4.5	Моделювання режимів роботи скалярного та векторного ЧР електроприводу насосної установки.....	93
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРО- ТЕХІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ.....	89
5.1	Основні небезпечні та шкідливі виробничі чинники під час експлуатації насосних станцій.....	90
5.2	Основні вимоги до безпеки при обслуговуванні електроустановок насосних станцій.....	91
5.3	Створення безпечних умов виконання робіт на НС за рахунок організаційних та технічних заходів.....	93
5.4	Заходи щодо запобігання аварій та ліквідації їх наслідків на НС	96
5.5	Дослідження стійкості роботи системи управління НС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	98
	ВИСНОВКИ.....	101
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	103

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НС - насосна станція

ВКГ – водопровідно-каналізаційне господарство

НУ - насосна установка

НА – насосний агрегат

КРП – крава розподілу подач

МВ – мережа водопостачання

АД з КЗ- асинхронний двигун з короткозамкненим ротором

ПЧ – перетворювач частоти

ЧР - частотнорегульований

ВН – відцентровий насос

ЕЕ – електрична енергія

ККД – коефіцієнт корисної дії

РГ – регульований

НРГ – нерегульований

НХ – насосна характеристика

САК – система автоматичного керування

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор

АСК - автоматизована система керування

КІМ – комп'ютерна імітаційна модель

ОП – охорона праці

ЕМІ - електромагнітний імпульс

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах зростаючого попиту на енергоресурси та необхідності зниження витрат енергії, питання енергоефективності стає пріоритетним для багатьох галузей, зокрема для систем водопостачання. Насосні станції є одними з найбільших споживачів електроенергії у водопровідних мережах, тому їх модернізація і оптимізація режимів роботи дозволяють значно скоротити експлуатаційні витрати. Застосування енергоефективних рішень, таких як частотні перетворювачі та оптимальне управління продуктивністю насосних агрегатів, сприяє підвищенню надійності системи водопостачання, зменшенню витрат електроенергії та негативного впливу на навколишнє середовище.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи полягає в дослідженні та формуванні енергоефективної структури насосної станції, спрямованої на оптимізацію її функціонування з мінімальним використанням електроенергії.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих схем роботи насосних станцій та їх енергоспоживання;
- визначити можливості впровадження частотного регулювання для зниження енерговитрат;
- розробити рекомендації щодо оптимального розподілу навантаження між насосами;
- провести моделювання роботи насосної станції з метою оцінки енергетичної ефективності різних режимів;
- оцінити економічний ефект від впровадження енергоефективних технологій.

Об'єктом дослідження являються процеси функціонування насосної станції в системі водопостачання.

Предметом дослідження є методи підвищення енергоефективності насосних агрегатів шляхом вибору їх оптимальної конфігурації, режимів роботи та застосування частотного регулювання.

Методи дослідження. У роботі використовуються теоретичні методи аналізу систем водопостачання, математичне моделювання, а також інструменти комп'ютерного моделювання, наприклад програма MATLAB додаток Simulink, для оцінки енергоефективності режимів роботи насосних станцій. Дослідження ґрунтується на принципах теорії автоматичного управління, обчислювальних методах, аналізі робочих характеристик насосів та використанні сучасних програмних комплексів для моделювання.

Науково-практична цінність роботи полягає у розробці рекомендацій щодо енергоефективного управління насосними станціями, що дозволяє знизити споживання електроенергії та покращити стабільність водопостачання. Доведено, що визначення енергоефективної структури насосної станції, потребує проведення ретельного аналізу технологічних параметрів НС, правильного вибору потужності та кількості насосів і частотних перетворювачів, визначення типу системи управління, який буде забезпечувати оптимальний режим роботи насосної установки.

Результати кваліфікаційної роботи доцільно використовувати для насосних станцій, що мають змінний графік водоспоживання, як для модернізації існуючих, так і для проектування нових енергоефективних систем.

1 ОГЛЯД РЕЖИМІВ РОБОТИ НАСОСНИХ УСТАНОВОК СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ

1.1 Сучасні насосні станції систем водопостачання. Різновиди та їх характеристика

Централізованими системами водопостачання забезпечені всі міста України, селища міського типу та сільські населені пункти. Потужності комунальних та відомчих водопроводів складають понад 14,3 млн. м³ на добу, що забезпечує середньодобове водоспоживання на 1 міського мешканця в обсязі 326 літрів [1]. Близько 30 % загального водоспоживання задовольняється за рахунок підземних джерел. Структурна схема водопостачання може бути представлена у вигляді (рис.1.1).

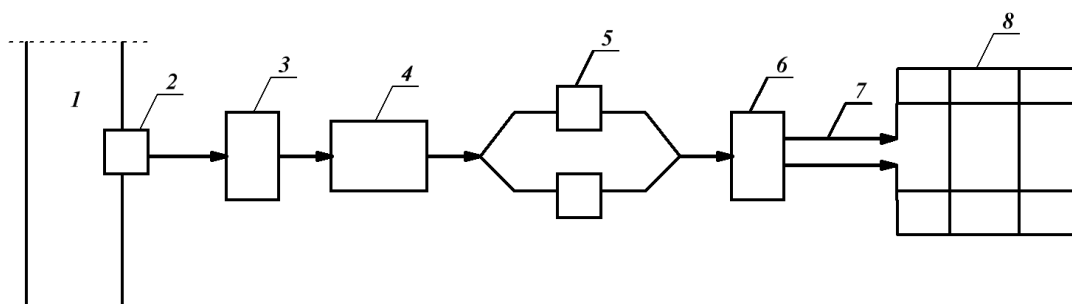


Рисунок 1.1 - Структурна схема водопостачання: 1 – джерело водопостачання; 2 – водозабірна споруда; 3 – НС I-го підйому; 4- очисні споруди; 5 – РЧВ; 6 - НС II-го підйому; 7 – магістральні водоводи; 8 – розподільча мережа

Зношеність основних фондів є найбільш актуальною проблемою водопровідно-каналізаційного господарства (ВКГ), насосне обладнання зношене більш ніж на 38% [1].

Насосні станції (НС) проектувались і були побудовані із врахуванням перспективи розвитку населених пунктів, постійного зростання споживання води. В умовах сьогодення, потужності насосних станцій не відповідають фактичному навантаженню. Як правило, насоси в таких випадках працюють при завищених напорах, а в деяких випадках з неповністю відкритими засувками або з улаштуванням обвідних ліній і мають низькі коефіцієнти корисної дії.

У собівартості послуг підприємств водопровідно-каналізаційного господарства енергетична складова доходить до 60% [5]. Підприємства водопровідно-каналізаційного господарства мають значні резерви у енергозбереженні і, перш за все, у зниженні долі енергетичної складової у собівартості. Саме підвищення ефективності роботи насосних агрегатів, впровадження нового високоефективного насосного обладнання дасть змогу отримати заощадження енергетичних ресурсів.

Існуючі системи водопостачання не забезпечують помітного зниження споживаної потужності при зменшенні витрати, а також обумовлюють істотне зростання тиску (напору) у системі, що призводить до витоків води і несприятливо позначається на роботі технологічного устаткування і мереж водопостачання.

Традиційні способи регулювання подачі насосних установок полягають в дроселюванні напірних ліній насосів і зміні загального числа працюючих агрегатів за одним з технологічних параметрів - тиску на колекторі в точці мережі, рівню в прийомному чи регулюючому резервуарі тощо. Ці способи регулювання спрямовані на вирішення технологічних задач і практично не враховують енергетичних аспектів транспорту води. При такому регулюванні майже 20 % споживаної електроенергії витрачається нераціонально через втрати енергії в дроселюючому органі; створення надлишкових напорів у трубопровідній мережі; витоків і непродуктивних витрат води в мережі й у споживача тощо.

Тому з появою надійного регульованого електропривода створилися передумови для розробки принципово нової технології транспорту води з плавним регулюванням робочих параметрів насосної установки без непродуктивних витрат електроенергії із широкими можливостями підвищення точності й ефективності технологічних критеріїв роботи систем водоподачі.

Насосні станції знаходять широке застосування в промисловості, житлово-комунальному господарстві. Вони характеризуються великим різноманіттям

функцій, схем з'єднання насосів, регульованих параметрів, категорій надійності та іншими показниками.

В залежності від призначення можна виділити наступні види НС:

- господарсько-питного водопостачання населених пунктів і промислових підприємств;
- оборотного водопостачання промислових підприємств;
- каналізаційні, системи тепlopостачання, дренажні, протипожежного водопостачання, нафто перекачуючи та інші.

За способом об'єднання насосів можна виділити НС з індивідуальною роботою насосів і НС з сумісною роботою насосів. Перший випадок характерний для НС з невеликими одиночними потужностями насосів та низькими вимогами до надійності роботи.

Сумісно працюючі насоси знаходять широке застосування на всіх видах НС. При цьому для забезпечення потрібних технологічних показників використовується паралельне, послідовне та комбіноване з'єднання установок. Найбільш характерним є паралельне з'єднання насосів, яке застосовується на більшості НС.

За головним регульованим параметром НС можна поділити на станції з регулюванням тиску та станції з регулюванням подачі.

Згідно з вимогами до надійності забезпечення подачі рідини, що транспортується до технологічного об'єкту, НС можна віднести до 1-ї, 2-ї або 3-ї категорії.

Основним енергетичним елементом НС являється насосна установка, що включає один або декілька насосів, систему трубопроводів, а також датчики технологічних параметрів установки.

Розглянемо приклад виконання насосної станції, яка забезпечує питною водою міський мікрорайон. Ця насосна станція працює як підвищувальна. По трубопроводу діаметром 500 мм подається питна вода з тиском 2,5-3 атмосфери. На насосній станції за допомогою насосних агрегатів типу Д 500-60 тиск

підвищується до 4-5 атмосфер, який є достатнім, щоб забезпечити питною водою підприємства та мешканців висотних будинків.

Основними споживачами електроенергії насосної станції являються асинхронні двигуни. Насосна станція має два машинних зали (рис.1.2). В першому встановлено два насосних агрегати типу Д 500-60 з типом двигуна А2-92-4 потужністю 132 кВт, частотою обертання 1000 об/хв, продуктивністю 500 м³/год та напором 60 м. В другому машинному залі встановлено 3 насосні агрегати типу Д 3210-40 з типом електродвигуна А2-91-4 потужністю 75 кВт, частотою обертання 1460 об/хв, продуктивністю 320 м³/год та напором 40 м, також в другому машзалі розташований дренажний насос для відкачування стоків з машзалу потужністю 8,4 кВт, частотою обертання 1500 об/хв, продуктивністю 25 м³/год, напором 32 м.

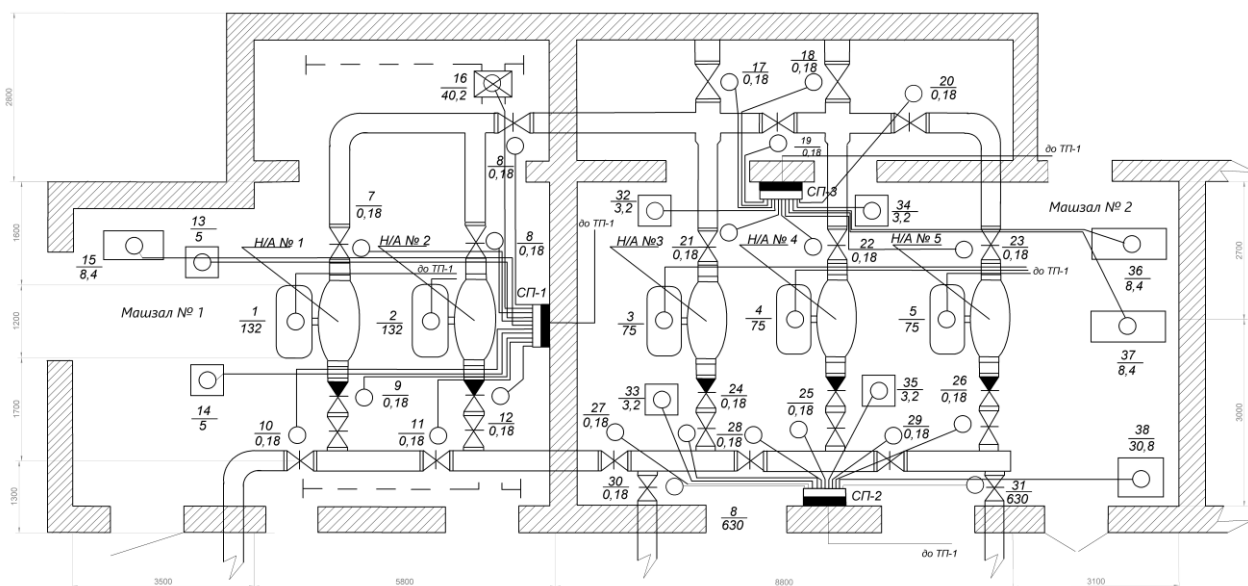


Рисунок 1.2 – Зображення плану насосної станції

Насосна станція має два резервуари чистої води – 3 тис.м³ кожен. Резервуари передбачені для того, щоб у разі припинення подачі води водопровідною насосною станцією підприємства та мешканці висотних будинків були забезпечені водою, тобто, щоб подача питної води була безперебійною а

також з метою забезпечення недоторканого протипожежного запасу. Висота резервуарів чистої води 4,5 м, недоторканий протипожежний запас - 1,5 м.

Основна частина енергоспоживання на насосних станціях приходить на долю насосних установок. Для невеликих насосних установок (з двигунами потужністю до 160 кВт) доля споживаємої електроенергії становить від 50% до 75%. При збільшенні потужності насосних установок (двигуни 800-1000 кВт) це значення доходить до 95%. На опалення НС витрачається близько (5-10)% загального споживання електроенергії, крім того, (2-3)% споживають допоміжні системи та механізми насосних станцій, (1-2)% - системи вентиляції та освітлення.

Таким чином, найбільше енергоспоживання приходить на основні насосні агрегати. Тобто, для забезпечення економічної роботи насосної установки, насамперед, повинна бути забезпечена економічна робота основних насосних агрегатів, з врахуванням допоміжних систем та механізмів, пристроїв вентиляції, освітлення та опалення.

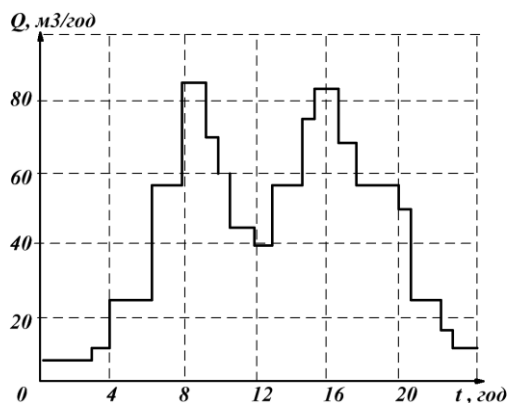
1.2 Аналіз режимів роботи насосних установок

На режими роботи НУ впливає зміна режимів водоспоживання, притоку стічної води. Ці зміни залежать від кліматичних та погодних умов (температура, вологість, атмосферний тиск, сонячне випромінювання), режиму роботи підприємства та інших факторів.

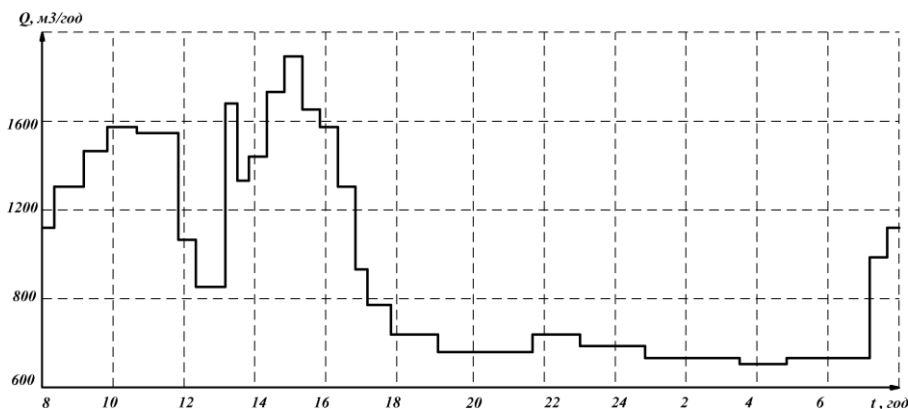
Для характеристики режиму водоспоживання вводяться відповідні графіки, які бувають добовими, тижневими, річними та іншими. На рис. 1.3 представлений приблизний добовий графік водоспоживання невеликого населеного пункту а) та промислового підприємства б).

Добовий графік водоспоживання є важливим інструментом для управління водопостачанням і планування майбутніх потреб у воді. Він показує загальне споживання води, зміну споживання води протягом року, залежно від сезону, денні та нічні піки. Добовий графік водоспоживання може бути використаний

для моніторингу споживання води, визначення середнього споживання води і планування заходів з енергозбереження.



а)



б)

Рисунок 1.3 - Добові графіки водоспоживання: а) – для невеликого населеного пункту; б) – для промислового підприємства

Для характеристики графіків водоспоживання вводяться коефіцієнтами нерівномірності: максимальний та мінімальний, які розраховуються за формулами:

$$K_{MAX} = Q_{MAX} / Q_{сер} ;$$

$$K_{MIN} = Q_{MIN} / Q_{сер} ,$$

де Q_{MAX} - значення максимального водоспоживання;

Q_{MIN} - значення мінімального водоспоживання;

$Q_{сер}$ – значення середнього водоспоживання.

Крім графіків, режим водоспоживання може характеризуватися кривою розподілу подач (КРП), яка показує діапазон зміни водоспоживання протягом певного проміжку часу та тривалість роботи системи з певним водоспоживанням. КРП використовується для планування майбутніх потреб у воді, оптимізації роботи водопровідної системи і виявлення проблем з водопостачанням.

КРП має певні переваги перед графіком водоспоживання, коли потрібно проводити дослідження за тривалий відрізок часу. Також, добові графік суттєво відрізняються за днями тижня, порою року і т.і., їх складно задати математичним рівнянням, тому для аналізу режимів НУ застосовують переважно криві розподілу водоподачі, які також називаються упорядкованими діаграмами водоподачі. На упорядкованій діаграмі ординати добових графіків розміщені у черзі збільшення протягом тривалого періоду часу.

Для характеристики нерівномірності подачі води вводиться поняття відносної мінімальної подачі:

$$\lambda = Q_{\min} / Q_{\max} \quad \text{або} \quad \lambda = K_{\min} / K_{\max},$$

де $Q_{\min}$ - значення найменшої подачі за добу мінімального водоспоживання;

$Q_{\max}$ – значення найбільшої подачі при максимальному водоспоживанні;

$K_{\min}, K_{\max}$ – значення коефіцієнтів нерівномірності за відповідний період часу.

Подача насосних установок, що працюють безпосередньо в мережу без проміжних резервуарів, повинна в кожний момент часу дорівнювати водоспоживанню (при відсутності витоків та непродуктивних витрат). В дійсності в будь-якій системі водо подачі є витрати та непродуктивні витрати, значення яких можуть становити 15 -20% загальної подачі. Таким чином подача насосної установки повинна бути більше водоспоживання саме на це значення.

Якщо водоспоживання стабільне, НС працюють з постійною подачею та напором. Поняття напір H тотожне терміну тиск p . Зв'язок між напором та тиском виражається формулою:

$$H = p / (\gamma \cdot g),$$

де H - величина напору, м;

p – величина тиску рідини насосу, Па;

g – значення прискорення вільного падіння, м/с²

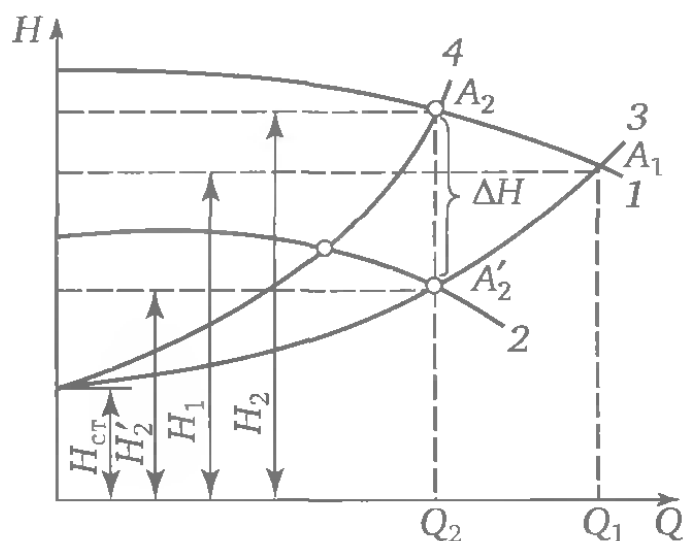
γ – значення щільність рідини, кг/м³.

Зі зростанням водоспоживання слід збільшувати подачу. При цьому відбувається збільшення втрат тиску в трубопроводах. Для компенсації цих втрат необхідно підвищити тиск, що створюється насосною установкою. При зниженні водоспоживання подачу і тиск слід відповідно зменшити. До цього часу узгодження водоспоживання та подачі виконувалося шляхом зміни кількості працюючих насосних агрегатів або регулювання ступеня відкриття засувки (затворів) на напірних трубопроводах насосів і установок. Сучасний підхід віддає перевагу регулюванню частоти обертання робочих коліс насосів за допомогою частотно-регульованого електроприводу.

Режим роботи для НУ, яка постачає воду користувачеві через акумулюючий резервуар (наприклад, водонапірну башту), відрізняється тим, що в окремі моменти часу обсяг подачі насосної установки не співпадає з обсягом водоспоживання. Якщо подача перевищує водоспоживання, рівень води у резервуарі піднімається, якщо подача менша — він знижується. Коли подача дорівнює водоспоживанню, рівень води стабілізується на певній позначці. У такому випадку регулювання водоспоживання та подачі НУ, яка включає один насосний агрегат без застосування регульованого електроприводу, здійснюється шляхом увімкнення агрегату при досягненні нижнього рівня води та його вимкнення при досягненні верхнього рівня. Цей процес повторюється циклічно. Якщо насосна установка має кілька агрегатів, її робочий режим налаштовується так, щоб були визначені кілька верхніх і нижніх рівнів, при досягненні яких відбувається зміна кількості задіяних агрегатів.

Відцентрові насоси можуть регулюватися за рахунок зміни ступеню відкриття засувки (затвору) на напірній лінії або більш економічно, зміною частоти обертання робочих коліс. Порівняння цих двох способів показано на рис. 1.5. Зміна положення затвору приводить до зміни крутизни характеристики

трубопроводу (криві 3 та 4). Цей спосіб регулювання називається дроселюванням та має більші втрати енергії ніж зміна частоти обертання насосів.



1- напірна характеристика насоса при номінальній частоті обертання; 2 – характеристика насоса при зниженій частоті обертання; 3 – характеристика трубопроводу при відкритій засувці; 4 – характеристика трубопроводу при частково відкритій засувці.

Рисунок 1.5 - Регулювання режимів роботи насосної установки

Зміна частоти обертання колеса насоса приводить до зміни положення $Q-H$ напірної характеристики насоса. При зменшенні частоти обертання вона переміщується вниз, паралельно самій собі. Тоді робоча точка, що переміщується по характеристиці трубопроводу, прийме положення A_2' , що відповідає меншій подачі та напору. При збільшенні частоти характеристика переміщується аналогічно доверху. Такий спосіб обертання являється більш економічним, але для його реалізації необхідно встановлення регульованого електроприводу.

Необхідний контроль за режимами роботи НУ виконується за допомогою вимірювальних пристроїв: витратомірів, манометрів, рівнемірів, амперметрів та інших. Зміна режиму роботи НУ впливає на робочий режим окремих насосних агрегатів, що входять до її складу.

Для аналізу та розрахунку режимів роботи насосних установок використовуються характеристики насосів і трубопроводів.

1.3 Керування продуктивністю насосної установки зміною частоти обертання

При зміні частоти обертання за рахунок регульованого електроприводу відбувається зміна положення характеристик насосу, що одночасно впливає на зміну його робочих параметрів. Ці значення параметрів при новій частоті обертання можна визначити по формулам приведення:

$$\begin{aligned} Q_1 / Q_2 &= n_1 / n_2; & H_1 / H_2 &= (n_1 / n_2)^2; \\ N_1 / N_2 &= (n_1 / n_2)^3; & M_1 / M_2 &= (n_1 / n_2)^3. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Формули (1.1) є приблизні, так як не враховують зміну ККД при зміні подачі та напору.

За даними формулами можливо виконувати розрахунки робочих параметрів ВН при регулюванні частоти обертання тільки якщо насос працює без статичного напору. У разі роботи зі статичним напором потрібно враховувати характеристику трубопроводу.

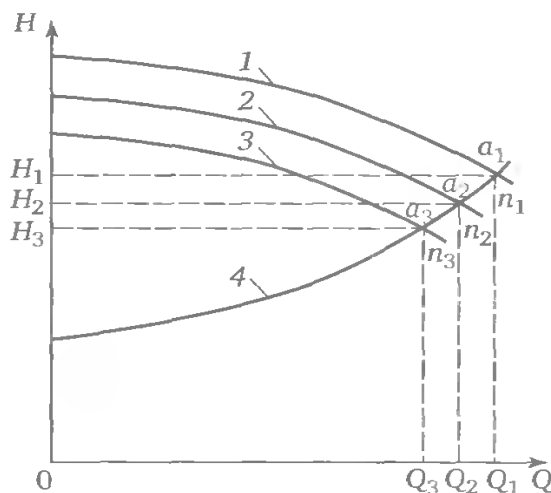
Напірна $Q - H$ характеристика ВН, який працює з регульованою частотою обертання має вигляд:

$$H = H_{\phi} \cdot \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^2 - S_{\phi} \cdot Q^2, \quad (1.2)$$

де H_{ϕ} і S_{ϕ} – величини фіктивних параметрів насосу;

$n_{ном}$ і n – відповідно, номінальне та змінне значення частоти обертання насосу.

З формули (1.2) можливо зробити висновок, що при постійній подачі гідравлічні втрати в насосі не залежать від частоти обертання. Тобто, при зміні частоти обертання напірні характеристики насосу будуть подібними та змінюють своє положення на графіку по вертикалі. На рис.1.6 представлено декілька регульованих характеристик (1,2 та 3) та характеристика трубопроводу (4).



1, 2, 3 – напірні характеристики насосу, що відповідають регульованій частоті обертання при n_1, n_2, n_3 відповідно;
4 – характеристика трубопроводу

Рисунок 1.6 - Характеристики сумісної роботи регульованого насосу та трубопроводу

Характеристика трубопроводу описується залежністю (1.3) .

$$H_c = H_{cm} - S \cdot Q^2, \quad (1.3)$$

де H_c – значення напору на початку трубопроводу; H_{cm} – значення статичного напору, який обумовлено різницею геодезичних відміток; S – значення гідравлічного опору трубопроводу.

З наведеного графіку видно, що при зміні частоти обертання n , робочі точки a переміщуються по характеристиці трубопроводу. Цим робочим точкам відповідає нове значення напору H . Відповідно:

$$n_1 \rightarrow a_1 \rightarrow H_1;$$

$$n_2 \rightarrow a_2 \rightarrow H_2$$

$$n_3 \rightarrow a_3 \rightarrow H_3.$$

$$Q = Q_{\phi} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{n}{n_{ном}}\right)^2 - \left(\frac{H_n}{H_{\phi}}\right)}{1 - \left(\frac{H_n}{H_{\phi}}\right)}}, \quad (1.4)$$

де H_{Π} – величина статичної складової напору ($H_{\Pi} = H_{cm}$) .

Приймаємо базисні значення H_6 , $n_{\text{ном}}$ та Q_6 . Тоді у відносних одиницях рівняння матиме вигляд:

$$Q^* = \sqrt{\frac{n^{*2} - \left(\frac{H_n^*}{H_\phi^*}\right)}{1 - \left(\frac{H_n^*}{H_\phi^*}\right)}}, \quad (1.5)$$

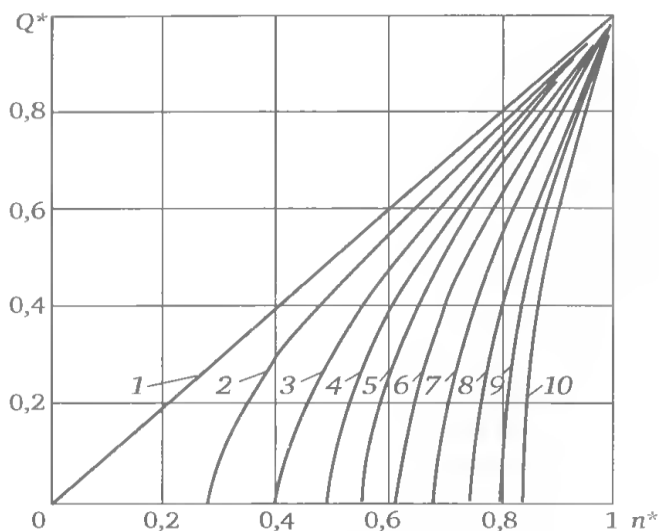
де $Q^* = Q/Q_6$ – значення відносної подачі;

$H_n^* = H_n/H_6$ – значення відносного статичного напору;

$H_\phi^* = H_\phi/H_6$ – значення відносної фіктивної висоти підйому рідини;

$n^* = n/n_{\text{ном}}$ – значення відносна частота обертання насосу.

Відповідно до формули (1.5) побудовані криві залежностей зміни подачі насосу Q від частоти обертання n для різних значень відношення H_n/H_ϕ (рис.1.7).



Значення H_n/H_ϕ :

1 – 0;	6 – 0,4;
2 – 0,08;	7 – 0,48;
3 – 0,16;	8 – 0,56;
4 – 0,24;	9 – 0,64;
5 – 0,32;	10 – 0,72.

Рисунок 1.7 - Зміна подачі насосу в залежності від частоти обертання при різних значеннях H_n/H_ϕ

Аналогічно визначена залежність зміни напору H від частоти обертання:

$$H^* = H_n^* + (1 + H_n^*) \cdot \frac{\left[n^{*2} - \left(\frac{H_n^*}{H_\phi^*} \right) \right]}{1 - \left(\frac{H_n^*}{H_\phi^*} \right)}. \quad (1.6)$$

Відповідно до формули (1.6) побудовані криві залежностей зміни напору насосу Q від частоти обертання n для різних значень відношення H_n/H_ϕ та при значенні $H_\phi^* = 1,25$ (рис.1.8).

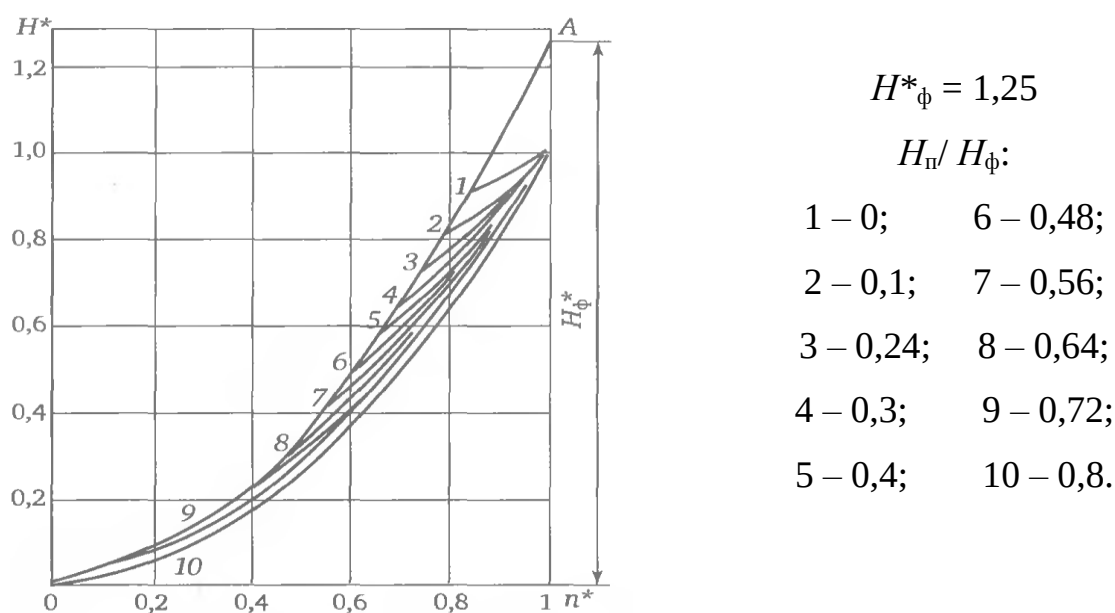


Рисунок 1.8 – Залежність напору насосу від частоти обертання при різних значеннях H_n / H_ϕ

Важливим показником для оцінки режиму роботи насосу є зміна його параметрів, коли подача $Q=0$, а напір $H=H_{ст}$. Тоді відбувається закриття зворотнього клапану НУ, або у разі його відсутності вода тече в протилежному напрямку. Такі величини напору і частоти обертання мають координати точок перетину кривої ОА з графіками $H^* = f(n^*)$.

Дуже важливим параметром для насосу являється його коефіцієнт корисної дії (ККД). Формула, що виражає залежність ККД від частоти обертання має вигляд:

$$\frac{1-\eta_2}{1-\eta_1} = \left(\frac{D_1^2 \cdot n_1}{D_2^2 \cdot n_2} \right)^2, \quad (1.7)$$

де D_1 , n_1 та η_1 – величини діаметру робочого колеса насосу, частоти обертання та ККД насосу, відповідно; η_2 , n_2 , D_2 – ті самі параметри геометрично подібного насосу. Після виконання перетворень отримаємо:

$$\eta = 1 - \frac{1 - \eta_{ном}}{(n^*)^{0.36}}, \quad (1.8)$$

де $\eta_{ном}$ – величина ККД насосу для номінальної частоти обертання.

За допомогою вищенаведених рівнянь визначені залежності у відносних одиницях для потужності, що споживається регульованим насосом та моменту опору при різних значеннях $H_{п}/H_{ф}$ (рис. 1.9 а) та б).

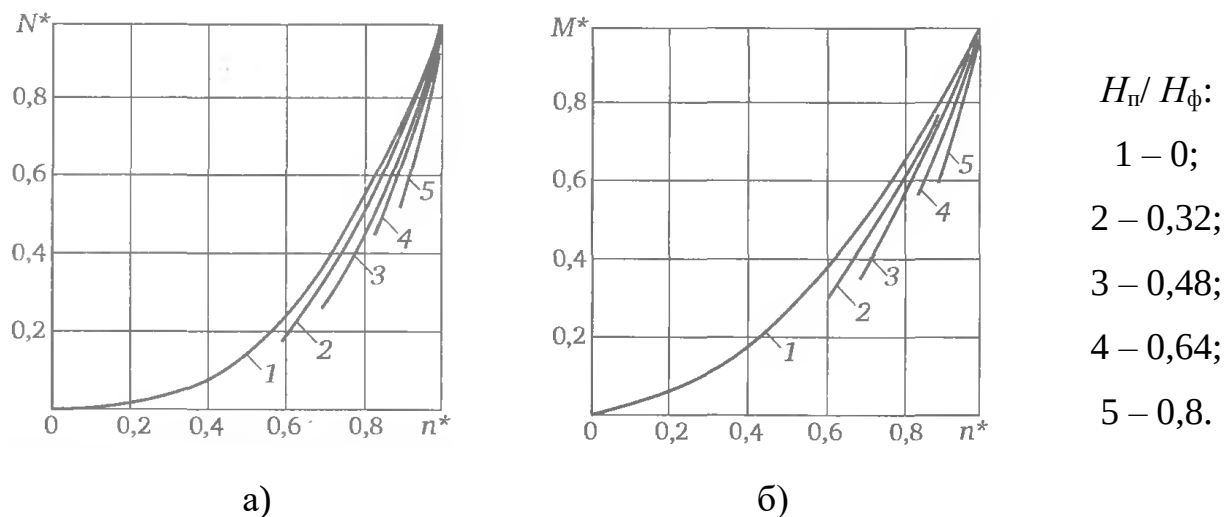


Рисунок 1.9 - Зміна споживаємої потужності а) та моменту опору насосу б) в залежності від частоти обертання при різних значеннях $H_{п}/H_{ф}$

Дуже важливим параметром для насосу є його механічна характеристика. Вона представляє залежність моменту опору на валу насоса та частоти обертання. У відносних одиницях таку залежність можна виразити наступним чином:

$$M_o^* = \frac{Q^* \cdot H^*}{\eta^* \cdot n^*}. \quad (1.9)$$

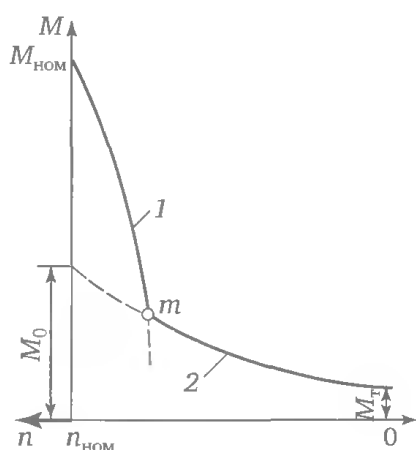
Наведені рівняння являються робочими, поки напір, який розвивається насосом не стане дорівнювати статичному напору, тобто протитиску. В цей момент подача насоса і коефіцієнт корисної дії дорівнюють нулю, і рівняння мають невизначеність виду $0/0$. Такий режим відповідає граничній частоті обертання, яка далі визначає неробочий режим насосу.

Якщо частота обертання стає менше граничної, момент опору можливо визначити за рівнянням:

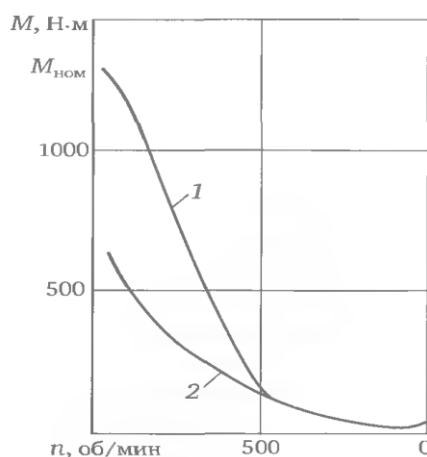
$$M_{оп} = (M_0 - M_T) \cdot (n / n_{ном})^2 + M_T, \quad (1.10)$$

де M_0 – значення моменту опору насоса у разі закритої засувки та номінальної частоти обертання M_0 ; M_T – значення моменту опору насоса, який обумовлено тертям в сальниках і підшипниках.

Можна зробити висновок, що механічна характеристика ВН при статичному напорі буде мати дві частини, перша будується у відповідності до (1.8), а друга – відповідно до (1.9). На рис.1.10 наведено для порівняння експериментальну механічну характеристику: рис.1.10а) та дослідну - рис.1.10 б).



а)



б)

1 – робоча гілка;
2 – гілка
холостого ходу

Рис.4.11. Механічна характеристика насоса : а) – експериментальна;

б) - дослідна

Отримані залежності показують, що робочі параметри насосу потрібно визначати як результат спільної роботи насосної установки та мережі трубопроводів з врахуванням реального режиму роботи та характеристик.

Впровадження регулювання продуктивності НС зміною швидкості обертання робочого колеса, висуває додаткові умови до визначення допустимого діапазону частот для забезпечення певного режиму роботи НС.

Потрібно знаходити частоту обертання колеса насоса, яка б забезпечувала розміщення робочих точок на робочій характеристиці трубопроводу. Така частота може бути визначена шляхом спільного рішення рівнянь характеристики насоса та трубопроводу:

$$n = n_{НОМ} \sqrt{\frac{H_{\Pi}}{H_{\Phi}} + \left(1 - \frac{H_{\Pi}}{H_{\Phi}}\right) \cdot \left(\frac{Q}{Q_B}\right)^2}. \quad (1.11)$$

Робота насоса з даною частотою обертання дозволяє підтримувати мінімальні значення напору на виході НУ у межах зміни її продуктивності. Внаслідок усунення надмірного напору, енергоспоживання насоса знижується до можливого мінімуму.

2 КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ПРИ СУМІСНІЙ РОБОТІ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

2.1 Загальні положення сумісної роботи насосних агрегатів

Існує декілька способів регулювання режимів роботи насосних установок, які було розглянуто у попередньому розділі. Можливе одночасне застосування декількох способів регулювання. Вибір способу регулювання доцільно розглядати в залежності від кількості насосних агрегатів, схеми з'єднання та їх характеристик.

На насосних станціях, зазвичай, використовується декількох насосних агрегатів. Їх схема з'єднання може бути послідовною, паралельною чи змішаною. Змінюючи кількість працюючих насосів, їх схему з'єднання можливо впливати на загальну напірну характеристику НУ. Наприклад, на рис. 2.1 а) представлена схема насосної установки, яка складається з двох груп насосів. Кожна група складається з двох підпорних та одного магістрального насосів. Підпорні насоси 3 та 4; 5 та 6 з'єднані між собою паралельно, а магістральні насоси 1 та 2 з'єднані з підпорними послідовно.

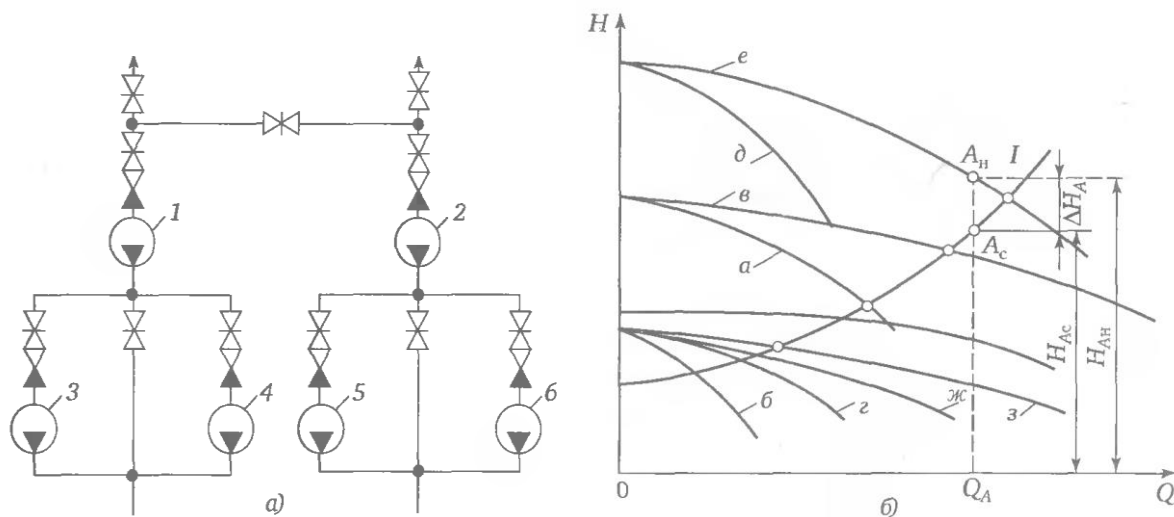


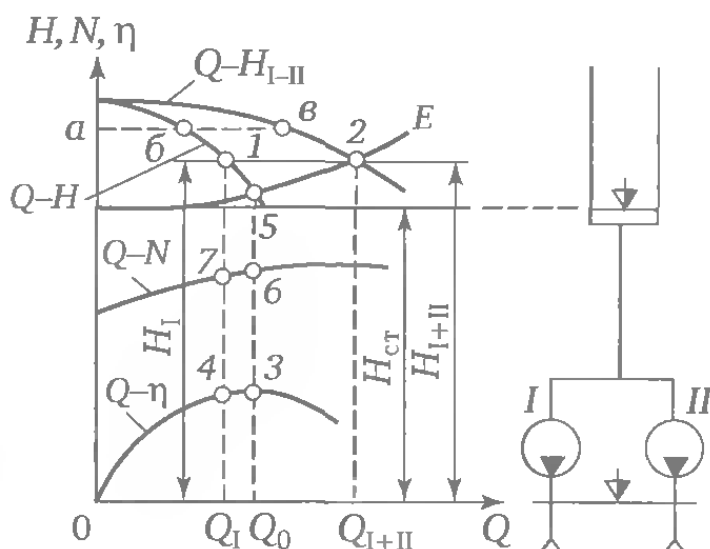
Рисунок 2.1 - Сумісна робота послідовно-паралельно з'єднаних насосів та магістралі: а) - послідовно-паралельне з'єднання насосів; б) – характеристики сумісної роботи насосів та магістралі

На рис. 2.1 б) представлені графіки сумісної роботи насосної установки та магістралі. На цьому графіку: 1 - характеристика системи трубопроводів. Напірні характеристики насосів у різних комбінаціях позначені від *a* до *з*, а саме: *a* – для одного магістрального насоса (1 або 2); *б* – для одного підпорного насоса (3 або 4, 5 або 6); сумісна характеристика для двох магістральних насосів (1+2); *г* – для двох підпорних насосів (3+4); *д* - для одного магістрального та 2-х підпорних насосів (1+3+4); *ж* – для трьох підпорних насосів; *з* - для 4-х підпорних насосів (3+4+5+6); *е* - для всієї насосної установки (1+2+3+4+5+6).

Використання насосів у різних комбінаціях збільшує кількість робочих режимів, кожному з яких відповідають свої значення витрати та тиску.

Для найбільш простого варіанту паралельної роботи двох однакових насосів, які подають рідину в один напірний трубопровід, використовують побудову сумарної характеристики. Така сумарна напірна характеристика отримується шляхом додавання абсцис окремих характеристик при однаковому значенні тиску, так як їх загальна витрата складається з витрат кожного насоса.

Характеристику спільної роботи 2-х однакових паралельно працюючих насосів та трубопроводу наведено на рис.2.2. Для одного насоса характеристика має позначення $Q - H$, при їх сумісній роботі - $Q - H_{I-II}$.



2 – робоча точка на сумарній характеристиці групи насосів;

5 – робоча точка на характеристиці одного працюючого насоса.

Рисунок 2.2 - Характеристики сумісної роботи двох однакових паралельно працюючих насосів і трубопроводу

У разі послідовної роботи двох насосів, перший здійснює подачу рідини у всасуючий патрубок другого, який в свою чергу здійснює подачу у трубопровід. Для побудови спільної напірної характеристики таких насосів, виконують додавання ординат їх характеристик при певному значенні подачі. При не ідентичності насосів, їх характеристики різні і робочі точки визначаються для кожної з характеристик.

Найекономічніший режим роботи насоса досягається, коли його продуктивність та напір відповідають значенням, що забезпечують максимальний ККД. Допускаються певні відхилення робочих параметрів від тих, що вказані в технічних каталогах, однак вони не повинні виходити за межі рекомендованих подач, відзначених вертикальними лініями на графіках $Q - H$. Вихід за ці межі призводить до зниження ККД, можливого перевантаження насосного агрегату, а також збільшує ймовірність виникнення кавітації та помпажу.

2.2 Регулювання продуктивності насосної станції зміною кількості працюючих насосів

При максимально можливому споживанні води насоси повинні забезпечувати подачу на рівні $Q_{\max}$. Якщо система складається лише з одного робочого насоса, то він має бути обраний таким чином, щоб його продуктивність не була нижчою за $Q_{\max}$, а також щоб він мав можливість гнучкого регулювання до мінімально необхідного рівня $Q_{\min}$. Проте, регулювання супроводжується енергетичними втратами, через що експлуатаційний ККД такого насоса буде низьким.

Крім того, для забезпечення безперебійної подачі води в систему необхідно встановити резервний насос із продуктивністю не меншою, ніж $Q_{\max}$, оскільки при наявності лише одного робочого насоса потрібно мати резерв у 100%. Однак такий підхід є невигідним через високу вартість резервного обладнання та енергетичні втрати під час експлуатації, або ж через значні капітальні витрати на забезпечення регулювання.

Встановлення двох однакових насосів може значно підвищити енергоефективність роботи системи та знизити аварійний резерв до 50% [8]. В цілому, збільшення кількості робочих насосів сприяє зменшенню аварійного резерву установки, а при сприятливій формі характеристики $\eta = f(Q)$ забезпечує енергоефективну експлуатацію.

Для більшості насосних станцій застосовують схему паралельного підключення насосів на спільну мережу. У разі паралельного підключення декількох насосів до однієї лінії, сумарна продуктивність буде дорівнювати сумі продуктивностей усіх насосів, що працюють одночасно, при цьому тиск, який вони створюють, залишатиметься практично однаковим [8]. Це дає змогу отримати сумарну характеристику для всієї групи насосів, що працюють у паралельному режимі.

При паралельній роботі насосних агрегатів (НА) їхня продуктивність визначається швидкістю обертання двигунів та характеристиками водопровідної мережі. Тому для оцінки реального споживання електроенергії кожним насосом необхідно враховувати їх паралельну роботу.

Для знаходження значення продуктивностей спільно працюючих насосів, розглянемо рівняння (в апроксимованому вигляді) [10] для двох типів насосів. Характеристика насосів першого типу (позначимо m) має виражений максимум та описується рівнянням (2.1), другого типу (позначимо n) – полога – рівняння (2.2):

$$H(v, Q) = A_1 \cdot v^2 + B_1 \cdot v \cdot Q + C_1 \cdot Q^2; \quad (2.1)$$

$$H(v, Q) = A_2 \cdot v^2 + C_2 \cdot Q^2 \quad (2.2)$$

де Q – величина продуктивності насосу, м³/год.; H – значення тиску на виході насосу, м; v – значення відносної швидкості обертання насосу, в.од.; A_1, B_1, C_1, A_2, C_2 – розрахункові коефіцієнти апроксимації, що визначаються за

паспортними характеристиками і залежать від конструктивного виконання турбомеханізму.

Враховуємо вираз для напірно-витратної характеристики мережі:

$$H = H_c + R_c \cdot Q^2, \quad (2.3)$$

де H_c – статичний напір, що необхідний для підйому рідини на визначену висоту, геодезичний напір; R_c – значення гідродинамічного опору мережі водопостачання.

У загальному випадку, якщо приводний двигун насосу працює в номінальному режимі, потрібно враховувати різницю їхніх швидкостей обертання. Це виконується за рахунок введення коефіцієнту узгодження швидкості обертання $k_y = n_{д.ном}/n_{н.ном}$, який показує, що робоче колесо насоса обертається з номінальною швидкістю двигуна.

Для знаходження продуктивностей насосів, які вони матимуть при сумісній роботі з трубопроводом, розв'яжемо систему рівнянь (2.4) відносно Q :

$$\begin{cases} H = k_{y1}^2 \cdot A_1 + B_1 \cdot k_{y1} \cdot Q_1 + C_1 \cdot Q_1^2; \\ H = k_{y2}^2 \cdot A_2 + B_2 \cdot k_{y2} \cdot Q_2 + C_2 \cdot Q_2^2; \\ H = H_c + R_c (mQ_1 + nQ_2)^2, \end{cases} \quad (2.4)$$

Визначимо продуктивності насосних агрегатів першого та другого типів:

$$Q_1(Q) = \frac{1}{2C_1} \left(-k_{y1} \cdot B_1 + \sqrt{k_{y1}^2 \cdot B_1^2 + 4C_1 \cdot H_c + 4C_1 \cdot R_c \cdot Q^2 - 4C_1 \cdot k_{y1}^2 \cdot A_1} \right); \quad (2.5)$$

$$Q_2(Q) = \frac{1}{2C_2} \left(-k_{y2} \cdot B_2 + \sqrt{k_{y2}^2 \cdot B_2^2 + 4C_2 \cdot H_c + 4C_2 \cdot R_c \cdot Q^2 - 4C_2 \cdot k_{y2}^2 \cdot A_2} \right). \quad (2.6)$$

Отримані показники продуктивності дозволяють визначити ККД насосних агрегатів при їх спільній роботі з водопровідною мережею, а також

оцінити ефективність всієї системи. Для забезпечення необхідної продуктивності слід підключити паралельно $k=m+n$ насосів. У цьому випадку, НА будуть працювати синхронно з мережею, забезпечуючи продуктивність насосної станції, яка буде не меншою за заданий рівень подачі.

Однак перевищення необхідної подачі призводить до збільшення втрат у трубопроводі та підвищення тиску в системі, що спричиняє надлишкове споживання електроенергії та знижує надійність водопостачання. Тому це перевищення слід враховувати в цільовій функції оптимізації як складову надлишкових витрат.

Важливим параметром є коефіцієнт витрат енергії на переміщення 1 м³ води, який визначається як середнє значення сформоване з витрат кожного насоса:

$$C_n = \frac{\sum_{i=1}^{m+n} \frac{c_i}{Q_i}}{m+n} \text{ кВт} \cdot \text{добу}, \quad (2.7)$$

де Q_i – значення номінальної продуктивності для i -го насоса.

Для вирішення задачі визначення комбінацій ввімкнених насосів, які забезпечують змінний графік водопостачання, потрібно знайти мінімум цільової функції:

$$C(t) = \sum_{i=1}^n (a \cdot c_i + d \cdot Z_{\text{мех},i} \cdot t_i(t) + e \cdot Z_{\text{ел},i} \cdot N_{ni}(t) \cdot x_i(t) + c_n [Q_{\text{дійсн.}}(x_i) - Q_{\text{спож.}}(t)]) \rightarrow \min \quad (2.8)$$

при виконанні обмежень на сумарну величину $Q_{\text{спож.}}$:

$$Q_{\text{спож.}} \leq Q_{\text{дійсн.}}(x_i) = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_i \leq Q_{\text{max}} \quad ; \quad (2.9)$$

та забезпечення спільної роботи з мережею водопостачання (рівняння 2.4).

Значення x та x_5 відповідно:

$$x_i = 0 \vee 1, \text{де } i = \overline{1, n-1}; \quad x_5 = 1. \quad (2.10)$$

Задача, яка описується виразами (2.8 – 2.10) є задачею математичного програмування лінійного типу [10].

Наприклад, розглянемо насосну станцію на якій працюють п'ять насосних агрегати. Вибрані насосні агрегати марки НКМ-G:

- насоси НКМ-G 150-400/390/75/4, $P_{\text{ном.,дв.}} = 75$ кВт – 2 шт. (перша група);
- насоси НКМ-G 200-400/408/110/4; $P_{\text{ном.,дв.}} = 110$ кВт – 3 шт. (друга група).

Витратно-напірні характеристики насосів першої групи можливо визначити за формулою (2.11), другої – (2.12):

$$H(Q) = 53,986 + 24,935 \cdot 10^{-3} \cdot Q - 5,2 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2; \quad (2.11)$$

$$H(Q) = 53,453 + 0,0218 \cdot Q - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2. \quad (2.12)$$

Параметри, що характеризують мережу водопостачання: $H_c = 35$, $R_c = 4,88 \cdot 10^{-5}$, тоді характеристика трубопроводу:

$$H = 35 + 4,88 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2. \quad (2.13)$$

Вибираємо коефіцієнти узгодження для насосів другого типу:

$$k_{y1} = 1,016, \quad k_{y2} = 1,021.$$

Обчислюємо мінімум цільової функції (2.8) для годин доби з різною комбінацією ввімкнених насосів. При цьому контролюємо виконання обмежень (2.9 – 2.10). Виходячі з вимог економії електроенергії, потрібно використовувати мінімальну кількість паралельно працюючих насосних агрегатів, крім того, така кількість НА повинна забезпечувати потрібне значення продуктивності. Отримані результати оптимізації зводимо до табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Комбінації ввімкнених насосів при сумісній роботі на мережу водопостачання

Час доби	№ НА/ подача, м³/год					Q _{дійсн.} , м³/год.
	1/320	2/320	3/500	4/320	5/500	
0..1	X	0	X	0	0	820
1..2	X	0	X	0	0	820
2..3	X	0	X	0	0	820
3..4	X	0	X	0	0	820
4..5	X	0	X	0	0	820
5..6	X	0	X	0	0	820
6..7	X	0	X	X	0	1320
7..8	X	0	X	X	0	1320
8..9	X	0	X	X	X	1820
9..10	X	0	X	X	X	1820
10..11	X	0	X	X	0	1320
11..12	X	0	X	X	0	1320
12..13	X	0	X	X	0	1320
13..14	X	0	X	X	0	1320
14..15	X	0	X	X	0	1320
15..16	X	0	X	X	0	1320
16..17	X	0	X	X	0	1320
17..18	X	0	X	X	0	1320
18..19	X	0	X	X	X	1820
19..20	X	0	X	X	X	1820
20..21	X	0	X	X	X	1820
21..22	X	0	X	X	X	1820
22..23	X	0	X	X	0	1320
23..24	X	0	X	X	0	1320

В цій таблиці значення $Q_{\text{дійсн.}}$ отримується додаванням номінальних значень продуктивностей окремих працюючих насосів. Отримані значення продуктивності протягом доби зображено на рис. 2.3.

Для визначення споживання електроенергії НА в такому режимі роботи, розглянемо зміну ККД протягом доби. Для цього визначимо потужність, що підводиться до валу насосу, представивши її поліномом третього порядку:

$$P = A_3 v^2 \cdot Q + B_3 v \cdot Q^2 + D_3 \cdot v^3, \quad (2.14)$$

де $v = \omega/\omega_{\text{ном}}$ – значення відносної швидкості обертання робочого колеса насоса;
 A_3, B_3, D_3 – розрахункові коефіцієнти апроксимації, що визначаються

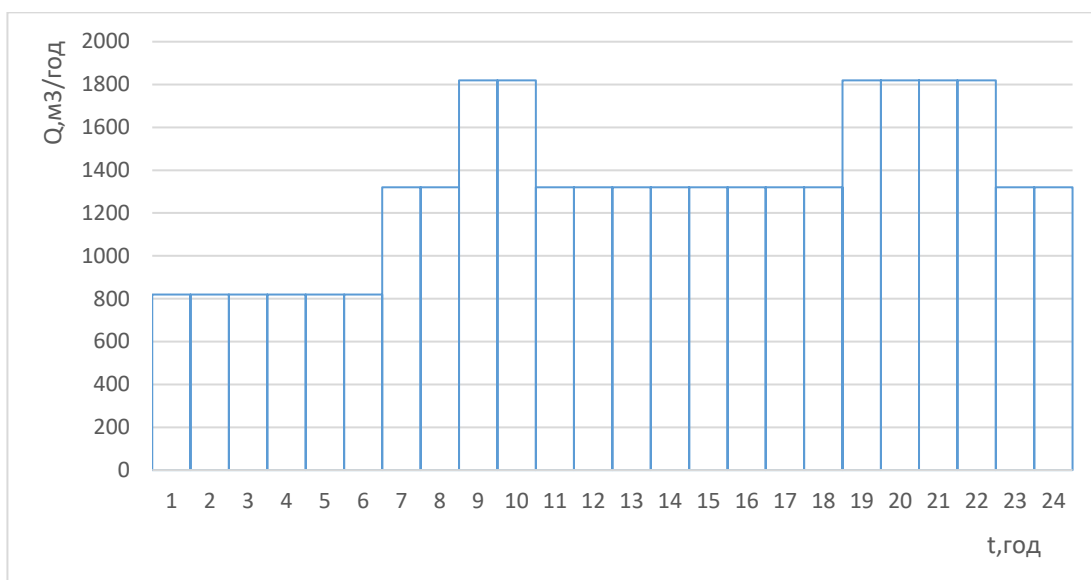


Рисунок 2.3 - Продуктивність НС при зміні кількості нерегульованих працюючих насосів

конструктивними особливостями насосу [10].

Формула для визначення ККД матиме вигляд:

$$\eta = \frac{P_{\kappa}}{P} = \frac{\rho \cdot g}{1000} \cdot \frac{A_1 \cdot v^2 \cdot Q + B_1 \cdot v \cdot Q^2 + C_1 \cdot Q^3}{A_3 \cdot v^2 \cdot Q + B_3 \cdot v \cdot Q^2 + D_3 \cdot v^3}. \quad (2.15)$$

Щоб оцінити ефективність роботи кожного насосного агрегату в складі групи з іншими агрегатами, слід підставити їхні продуктивності при спільній роботі у формулу (3.18). Для розрахунку споживання електроенергії двигунами насосів необхідно визначити енергетичні затрати на перекачування заданого об'єму рідини кожним НА з урахуванням коефіцієнта корисної дії насоса та його двигуна [11]:

$$P_{\delta} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_m \cdot \eta_n \cdot \eta_{\delta}}, \quad (2.16)$$

де η_{δ} – значення коефіцієнту корисної дії двигуна; H – величина тиску, що відповідає продуктивності насоса.

Розрахунки за формулою (2.16) зводимо до табл. 2.2, ККД двигуна вважаємо сталим.

Таблиця 2.2 – Споживання електроенергії насосними агрегатами станції протягом доби

Час доби	№ НА / споживання електроенергії, кВт·год					$E_{\text{заг.}}$, кВт·год
	1/ E_1	2/ E_2	3/ E_3	4/ E_4	5/ E_5	
0..1	83,8	-	128,9	-	-	212,8
1..2	83,1	-	127,5	-	-	210,6
2..3	85,8	-	133,0	-	-	218,8
3..4	85,2	-	131,8	-	-	217,0
4..5	83,5	-	128,2	-	-	211,7
5..6	85,6	-	128,5	-	-	214,1
6..7	83,0	-	122,9	122,9	-	328,7
7..8	88,1	-	128,1	128,1	-	344,2
8..9	84,5	-	121,1	121,1	121,1	447,8
9..10	89,4	-	130,7	130,7	130,7	481,6
10..11	81,6	-	120,0	120,0	-	321,6
11..12	84,9	-	126,7	126,7	-	338,3
12..13	85,6	-	128,5	128,5	-	342,6
13..14	85,6	-	128,5	128,5	-	342,6
14..15	83,3	-	123,6	123,6	-	330,5
15..16	83,9	-	124,8	124,8	-	333,5
16..17	84,4	-	126,0	126,0	-	336,4
17..18	82,4	-	121,7	121,7	-	325,7
18..19	82,4	-	121,7	121,7	144,5	470,2
19..20	82,4	-	121,7	121,7	144,5	470,2
20..21	81,0	-	118,9	118,9	141,2	459,8
21..22	82,5	-	122,1	122,1	145,0	471,8
22..23	83,5	-	124,1	124,1	-	331,6
23..24	83,1	-	127,5	151,4	-	362,0
Всього						8124,0

Результати розрахунків показують, що при даній комбінації ввімкнення двигунів насосів витрачається більша кількість енергії ніж в номінальному режимі. Сумарне значення електроенергії, яку споживає станція протягом доби при регулюванні продуктивності зміною кількості працюючих НА показано на рис. 2.4.

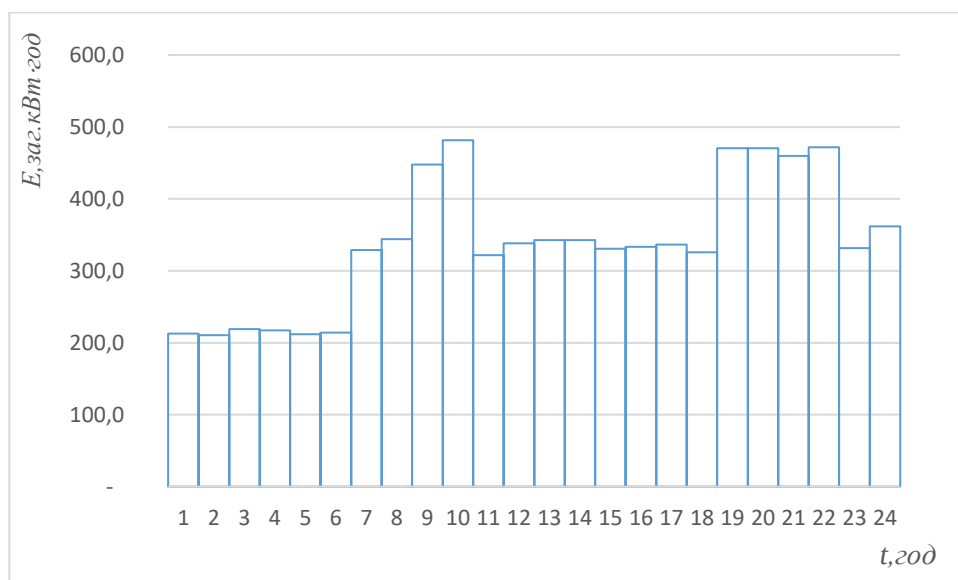


Рисунок 2.4 – Споживання електроенергії насосними агрегатами станції протягом доби

Отже, якщо для кожного необхідного значення продуктивності водопостачання застосовувати відповідні комбінації насосів, за добу станція споживатиме 8124,1 кВт·год. Однак це не дозволяє досягти точної продуктивності, що призводить до надмірних витрат енергії через зайвий тиск або ж до нестачі води в кінцевих ділянках трубопроводу. Для більш точного регулювання продуктивності паралельно працюючих насосних агрегатів розглянемо можливість використання регульованого електроприводу на одному з насосів.

2.3 Паралельна робота насосних агрегатів з регульованим електроприводом

Для підвищення енергоефективності насосів необхідно використовувати спосіб регулювання продуктивності, що мінімізує споживання електроенергії та забезпечує точну подачу. Якщо кількість води, що подається насосною станцією, не відповідає потребам споживачів, це призводить до перевитрат енергії та скорочення терміну служби обладнання. Встановлення перетворювачів частоти на двигуни насосів дозволяє значно скоротити енергоспоживання, але потребує значних капіталовкладень. Ефективним

варіантом є використання одного насоса з ПЧ у поєднанні з іншими нерегульованими насосами, як зазначено в дослідженні [10].

Виконаємо аналіз режиму паралельної роботи 2-х НА, з застосуванням регульованого електроприводу на одному з них:

$$\begin{cases} H_{01} - H_{02} \cdot v^2 = R_{e1} \cdot Q_1^2 - R_{e2} \cdot Q_2^2; \\ H_{01} - H_c = R_{e1} \cdot Q_1^2 + R_c \cdot Q_3^2; \\ Q_1 + Q_2 = Q_3, \end{cases} \quad (2.17)$$

де H_{01} , H_{02} – значення напорів, які розвивають насоси при нульовій подачі; R_{e1} , R_{e2} – величина внутрішнього опору нерегульованого та регульованого насосів, відповідно; H_c – значення статичного напору мережі водопостачання; R_c – значення гідродинамічного опору МВ; Q_1 , Q_2 , Q_3 – величина подач нерегульованого, регульованого та обох насосів разом.

У випадку ідентичності двох насосів, маємо $H_0 = H_{01} = H_{02}$ та $R_b = R_{e1} = R_{e2}$ і рівняння (2.17) приймають вигляд:

$$\begin{cases} H_0 - H_0 \cdot v^2 = R_e \cdot Q_1^2 - R_e \cdot Q_2^2; \\ H_0 - H_c = R_e \cdot Q_1^2 + R_c \cdot Q_3^2; \\ Q_1 + Q_2 = Q_3, \end{cases} \quad (2.18)$$

Проаналізуємо, як зміна швидкості обертання регульованого насосу впливає на сумарну продуктивність НУ. В розрахунки вводяться наступні позначення:

$$\alpha = \frac{Q_2}{Q_1}; \quad h = \frac{H_c}{H_0}; \quad \rho = \frac{R_c}{R_e}. \quad (2.19)$$

Отримаємо потрібне рівняння у вигляді:

$$Q_3 = \left(1 + \frac{2\rho - 2\rho \cdot v^2 - 2\sqrt{h^2 - h \cdot v^2 + v^2 - h - \rho + 2\rho \cdot v^2 - \rho \cdot v^4}}{2h - 2 - 2\rho + 2\rho \cdot v^2} \right) \times$$

$$\times \sqrt{\frac{H_0 \cdot (1 - v^2)}{R_g \cdot \left(1 - \frac{(2\rho - 2\rho \cdot v^2 - 2\sqrt{h^2 - h \cdot v^2 + v^2 - h - \rho + 2\rho \cdot v^2 - \rho \cdot v^4})^2}{(2h - 2 - 2\rho + 2\rho \cdot v^2)^2} \right)}}. \quad (2.20)$$

Для паралельно працюючих насосних агрегатів (НА) з різними характеристиками важливо правильно розподілити навантаження, щоб мінімізувати сумарні енергозатрати [10]. Найефективніший розподіл досягається, коли прирости потужності всіх насосів однакові, що може забезпечити до 5% економії електроенергії.

Розглянемо ситуацію, коли в системі є насоси різної потужності. Регулювання продуктивності здійснюється шляхом зміни кількості працюючих насосів для великих навантажень і частоти обертання одного насоса для малих навантажень. При цьому продуктивність станції в «малому» регулюється зміною частоти напруги двигуна. Спільна робота насосів описується системою рівнянь (2.22) з урахуванням насоса з регульованим приводом. Для оптимального регулювання продуктивність краще змінювати менш потужним насосом [10].

$$\begin{cases} H = k_{y1}^2 \cdot A_1 + B_1 \cdot k_{y1} \cdot Q_1 + C_1 \cdot Q_1^2; \\ H = k_{y2}^2 \cdot A_2 + B_2 \cdot k_{y2} \cdot Q_2 + C_2 \cdot Q_2^2; \\ H = A_2 \cdot v^2 + B_2 \cdot v \cdot Q_3 + C_2 \cdot Q_3^2; \\ H = H_c + R_c \cdot Q^2; \\ Q = mQ_1 + nQ_2 + Q_3, \end{cases} \quad (2.21)$$

де v – значення відносної швидкості обертання регульованого насоса, в. од.; Q_3 – величина продуктивності регульованого насоса, м³/год.; m – кількість насосів першого типу; n – кількість насосів другого типу, без врахування регульованого насоса.

Рішення рівняння (2.22) дозволяє отримати величини продуктивностей всіх насосів, при спільній роботі на мережу водопостачання:

$$Q_1(Q) = \frac{1}{2C_1} \left(-k_{y1} \cdot B_1 + \sqrt{k_{y1}^2 \cdot B_1^2 + 4C_1 \cdot H_c + 4C_1 \cdot R_c \cdot Q^2 - 4C_1 \cdot k_{y1}^2 \cdot A_1} \right);$$

$$Q_2(Q) = \frac{1}{2C_2} \left(-k_{y2} \cdot B_2 + \sqrt{k_{y2}^2 \cdot B_2^2 + 4C_2 \cdot H_c + 4C_2 \cdot R_c \cdot Q^2 - 4C_2 \cdot k_{y2}^2 \cdot A_2} \right);$$

$$Q_3(Q, m, n) = Q - \frac{m}{2C_1} \left(-k_{y1} \cdot B_1 + \sqrt{k_{y1}^2 \cdot B_1^2 + 4C_1 \cdot H_c + 4C_1 \cdot R_c \cdot Q^2 - 4C_1 \cdot k_{y1}^2 \cdot A_1} \right) - \\ - \frac{n}{2C_2} \left(-k_{y2} \cdot B_2 + \sqrt{k_{y2}^2 \cdot B_2^2 + 4C_2 \cdot H_c + 4C_2 \cdot R_c \cdot Q^2 - 4C_2 \cdot k_{y2}^2 \cdot A_2} \right).$$

Регулювання швидкості обертання регульованого насосу визначається кількості працюючих НА та необхідним значенням сумарної продуктивності. Для прикладу розглянемо можливі варіанти підключення насосів з застосуванням регульованого електроприводу. Один насос з регульованим електроприводом може працювати з різною кількістю нерегульованих: одним, двома або трьома. Тоді швидкість обертання регульованого насосу та його продуктивність будуть мати ступеневий характер і величина кожної сходинки визначається кількістю працюючих нерегульованих насосів.

При роботі насосів на 30-50% від номінальної продуктивності збільшується вібрація, виникають осьові та радіальні сили, що негативно впливає на вузли насоса, а також можливий помпаж [12]. Оптимальний режим - це робота з продуктивністю 70-120% від оптимального значення [12].

Нерегульовані НА при спільній роботі перевищують необхідну продуктивність, тоді як регульований НА змінює продуктивність майже лінійно. Зі збільшенням кількості насосів зменшується діапазон швидкості регульованого НА [9].

Отримані залежності продуктивності дозволяють визначити витрати електроенергії при роботі з регульованим електроприводом. Для цього знаходиться потужність, що споживається регульованим електроприводом, при

цьому, як і в попередньому випадку, ККД двигуна вважаємо сталим. Результати розрахунку цієї потужності наведено на рис. 2.5.

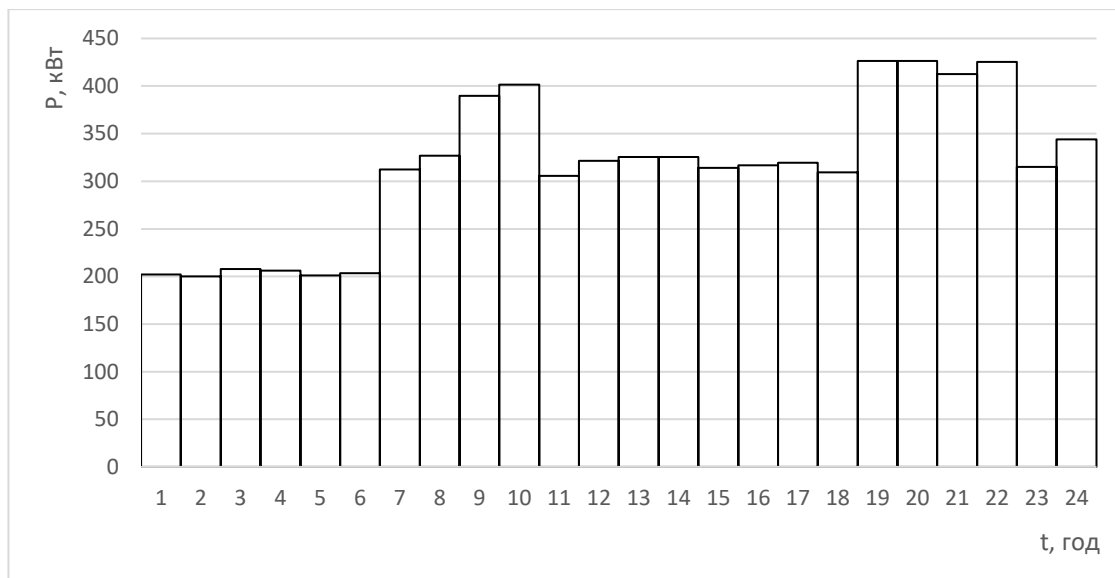


Рисунок 2.5 - Сумарна потужність, яку споживають двигуни НС при зміні кількості працюючих насосів та регулюванні швидкості обертання одного з них

За цими даними визначаємо споживання електроенергії двигунами НС за добу:

$$E_{\text{var}} = \sum_{i=0}^{23} \sum_{j=1}^5 E_{ij} = 7,538 \cdot 10^3 \quad \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{добу}.$$

Порівняно з варіантом регулювання продуктивності зміною кількості нерегульованих насосів отримується економія електроенергії:

$$E_{\text{const}} - E_{\text{var}} = 8,124 \cdot 10^3 - 7,538 \cdot 10^3 = 0,585 \cdot 10^3 \quad \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{добу}.$$

Таким чином, введення в схему насосної станції одного насосу з регульованим приводом дозволяє зменшити споживання електроенергії насосною станцією на 585 кВт·год/добу.

Оптимальне значення величини подачі води на насосній станції отримується за рахунок поєднання двох способів регулювання продуктивності. Змінюється кількість ввімкнених насосів, де $m+n$ нерегульованих та один регульований, який здійснює зміну частоти обертання робочого колеса для насоса меншої потужності.

Правильний вибір законів керування електроприводами насосів, коли забезпечується необхідне значення їх подачі з мінімальним споживанням електроенергії, є перспективним енергозберігаючим заходом. Це особливо актуально у зв'язку з постійним збільшенням цін на електроенергію та воду і дозволяє отримати приблизно 30 % економії електроенергії та до 20 % води [12].

3 ФОРМУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СТРУКТУРИ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

3.1 Визначення основних параметрів роботи насосних станцій та варіантів сумісної роботи насосів

Перш за все, для аналізу режимів роботи насосних установок проводиться визначення їх основних параметрів. Такими параметрами являються: подача за розрахунковий період, найбільша - $Q_{\text{нб}}$ та найменша - $Q_{\text{нм}}$; напір, який відповідає найбільшій подачі - $H_{\text{нб}}$; діапазон, що визначає коливання рівня в резервуарах - ΔH ; протитиск в системі - $H_{\text{п}}$. Визначаються добові графіки подачі рідини насосних установок для мінімальних та максимальних подач, залежності напору на напірному колекторі, всасуючих та напірних лініях.

Виконується систематизація даних щодо річного споживання електроенергії, питомих витрат енергії на подачу води та перекачку стоків, вартість енергії, що споживається та води, що подається.

Розглянемо приклад насосної станції, основні технологічні параметри якої наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні технологічні параметри НС.

№ п/ч	Параметр	Розмірність	Вираз	Значення
1	2	3	4	5
1	Продуктивність максимальна	$\text{м}^3/\text{ГОД}$	$Q_{\text{нб}}$	320
		$\text{м}^3/\text{с}$		0,089
2	Продуктивність мінімальна	$\text{м}^3/\text{ГОД}$	$Q_{\text{м}}$	128
		$\text{м}^3/\text{с}$		0,036
3	Діапазон зміни подач за розрахунковий період	-	$\lambda = Q_{\text{м}} / Q_{\text{б}}$	0,40
4	Тиск при найбільшій подачі	м	$H_{\text{б}}$	50
5	Статичний протитиск в системі	м	$H_{\text{п}}$	35
6	Крутизна характ-ки трубопроводу	-	$H_{\text{п}}^* = H_{\text{п}}/H_{\text{б}}$	0,70

Продовження таблиці 3.1.

1	2	3	4	5
7	Фіктивна висота водопідйому, що відповідає нульовій подачі насосу	м	H_{ϕ}	54
8	Крутизна характеристики насосу	-	$H_{\phi}^* = H_{\phi}/H_6$	1,08
9	Тривалість розрахункового періоду	год	T	8760

В таблиці 3.2 наведено данні подачі води протягом доби. Як видно з таблиці, подача води змінюється приблизно у 2 рази.

Таблиця 3.2 – Данні добової зміни подачі води

t	год.	0..1	1..2	2..3	3..4	4..5	5..6	6..7	7..8	8..9	9..10	10-11	11-12
Q	м ³ /год	128	128	128	134	134	166	227	320	320	282	166	134
t	год.	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Q	м ³ /год	134	134	134	134	166	227	320	320	282	282	227	166

На підставі цих даних будується добовий графік водоспоживання НС, який приведено на рис. 3.1.

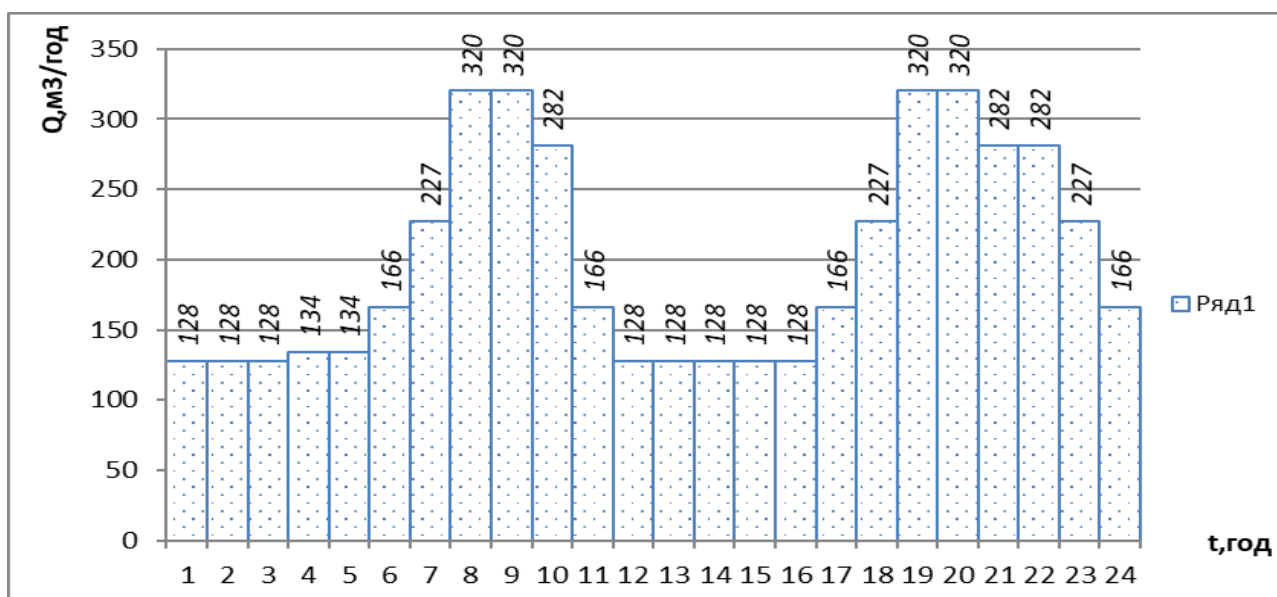


Рисунок 3.1 - Добовий графік водоспоживання насосної станції.

Далі, проводиться аналіз кількості насосів, найбільшої та найменшої, які забезпечують процес водоподачі і водовідведення за час розрахункового періоду та обираються типи таких насосів.

Дуже важливим є питання використання регульованого електроприводу, вибір якого проводиться за техніко-економічними розрахунками варіантів конфігурації насосної станції.

Кількість насосних агрегатів, що обладнані регульованим електроприводом залежить від їх загальної кількості. За рекомендаціями [12], регульованим електроприводом обладнується від $1/3$ до $1/2$ встановлених агрегатів. Так, наприклад, при загальній кількості агрегатів від 7 до 8, регульований електропривод встановлюється на 3-х або 4-х агрегатах. При максимальній кількості насосних агрегатів (до 15-ти), кількість регульованих насосів становить не менше 5-ти.

Якщо на насосній станції розміщуються насосні агрегати різної потужності, слід передбачити обладнання регульованим електроприводом найбільш крупного насосу, що має положу напірну характеристику. Бажано, щоб $Q-H$ характеристика насосу з регулюванням знаходилася трохи вище за характеристику нерегульованого насосу. Це дозволить запобігти утворенню при регулюванні так званих «мертвих зон».

На кількість обраних регульованих насосів впливає також можливість перевантаження нерегульованих насосів, зниження їх коефіцієнта корисної дії, вихід робочих точок нерегульованих насосів з робочої зони, або навіть випадки кавітації. В такому випадку, регульований електропривод слід встановлювати на всіх насосах та змінювати частоту обертання синхронно.

Для обраної вище насосної станції розглянемо вибір насосних агрегатів для наступних варіантів: встановлюється один регульований насос; регульований та нерегульований насоси, один регульований та два нерегульованих; два регульованих і два нерегульованих. Детально наведемо вибір одного регульованого насосу. Структурна схема підключення одного регульованого насосу представлена на рис.3.2.

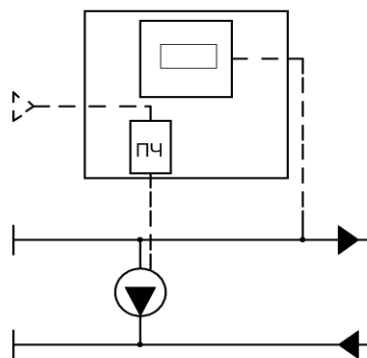


Рисунок 3.2 – Структурна схема підключення одного регульованого насосу.

Вибираємо насосний агрегат для забезпечення водопостачання. Приймаємо до встановлення насоси виробництва італійської компанії DAB, марки KDN збільшеного розміру. Для зручності та наочності вибору скористаємося графічною таблицею вибору моделей (рис. 3.3) [19], де для параметрів $H_{\text{ном}} = 50$ м та $Q_{\text{max}} = 320$ м³/год, знаходимо криву 150 - 400, яка відповідає моделі насосу KDN 150-400.

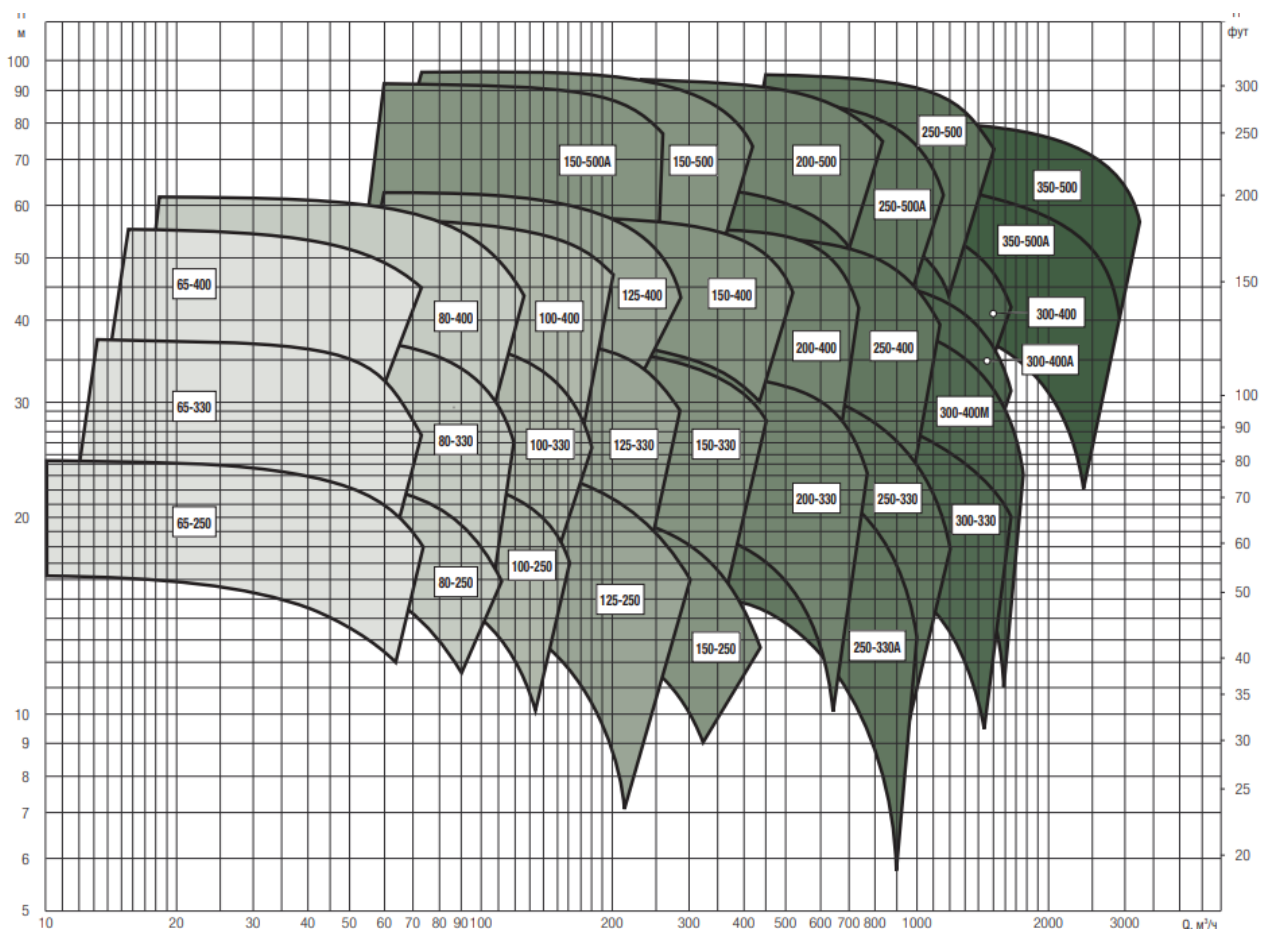


Рисунок 3.3 – Графічна таблиця вибору моделей насосів марки KDN

В серії насосів KDN 150-400 вибираємо характеристику (рис. 3.4) [19], яка максимально підходить за потрібними параметрами. Тоді, вибираємо для встановлення насос марки KDN – 150 - 400/390/75/4, з діаметром робочого колеса 390 мм.

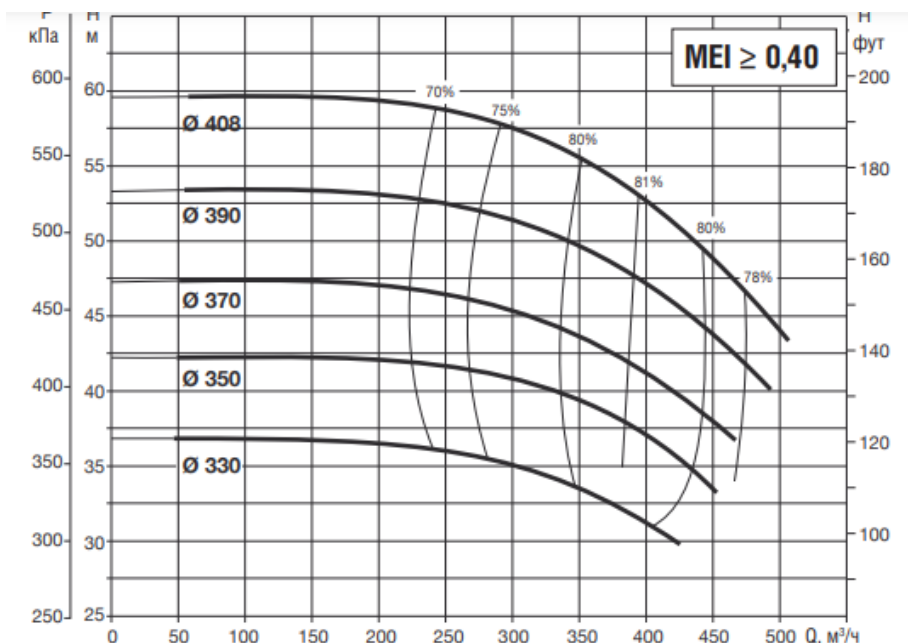


Рисунок 3.4 – Напірні характеристики насосу марки KDN 150-400 з різними діаметрами робочого колеса

Технічні дані насосу наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Технічні дані моноблочного насосу KDN-150-400/390 (1-й варіант)

Модель	Q, м³/год	0	60	70	80	100	120	150	180	200	250	300	350	400	450
KDN-150-400/390	H, м	54	53	53	53	53	53	53	53	53	52	51	50	47	44

Для першого варіанту визначаємо потужність, що споживається насосом при найбільшій подачі:

$$P_1 = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{\text{ном}} \cdot H}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot k_3 = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 320 \cdot 54}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,75 \cdot 1} \cdot 1,15$$

$$= 72,2 \text{ кВт}$$

де ρ – густина рідини що перекачується насосом, ; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; Q – продуктивність насосу, $\text{м}^3/\text{год}$; H – висота підйому, м;

η_n – ККД насосу (для відцентрових насосів з тиском вище 39 000 Па – 0,6 – 0,75; з тиском нижче 39 000 Па – 0,3 – 0,6 (краще всього визначати по даним каталогів)); η_n – ККД передачі ($\eta_n = 1$ при безпосередньому приєднанні насоса з двигуном); k_3 – коефіцієнт запасу, $k_3 = 1,1 – 1,4$.

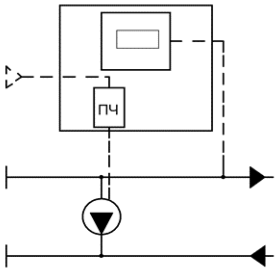
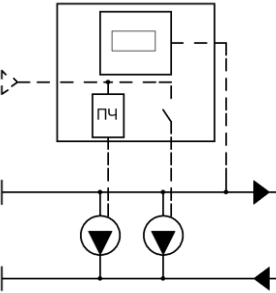
У якості електродвигуна насосу KDN - 150-400/390/75/4 використовується асинхронний двигун потужністю 75 кВт з частотою обертання 1480 об/хв. Технічні характеристики даного двигуна наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Технічні характеристики асинхронного двигуна (1-й варіант)

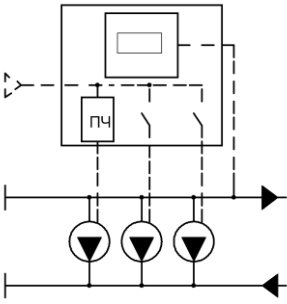
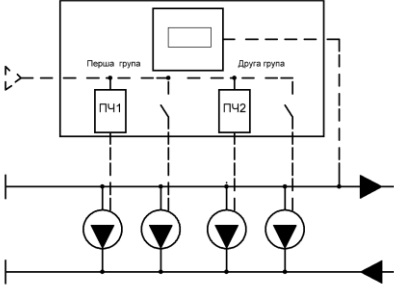
Тип двигуна	$P_{2\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi$	$I_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{тах}}/M_{\text{ном}}$
	кВт	об/хв	%	-	А	-	-	-
IE3 280S4	75,0	1480,0	94,48	0,876	132	8,69	2,96	3,56

Варіанти конфігурації насосної станції з різною кількістю насосних установок наведено в таблиці 3.5.

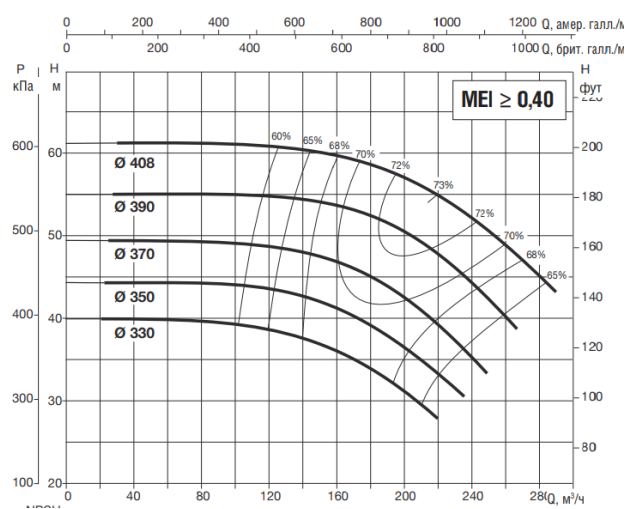
Таблиця 3.5 – Варіанти конфігурації насосної станції з різною кількістю насосних установок

Номер варіанту	Вигляд структурної схеми	Співвідношення регульованих та нерегульованих (РГ/ НРГ) насосів	Тип моделі насосу	Кількість та потужність (кВт) електродвигунів
1		1/0	KDN – 150 – 400/390	1x75
2		1/1	KDN – 125 – 400/390	2x37

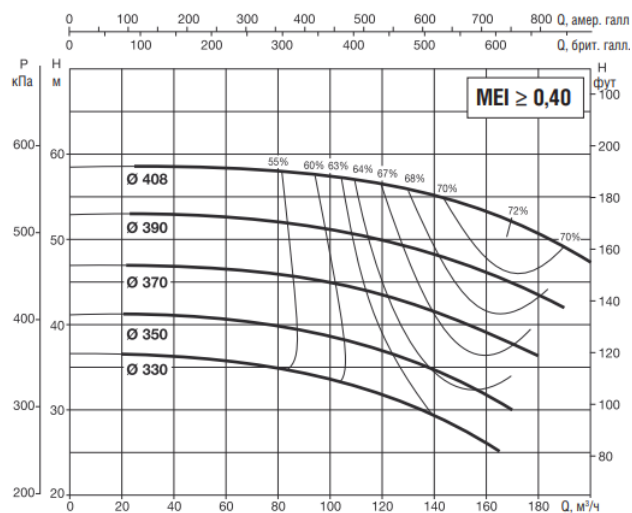
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5
3		1/2	KDN – 100 – 400/390	3x22
4		2/2	KDN – 80 – 400/390	3x18,5

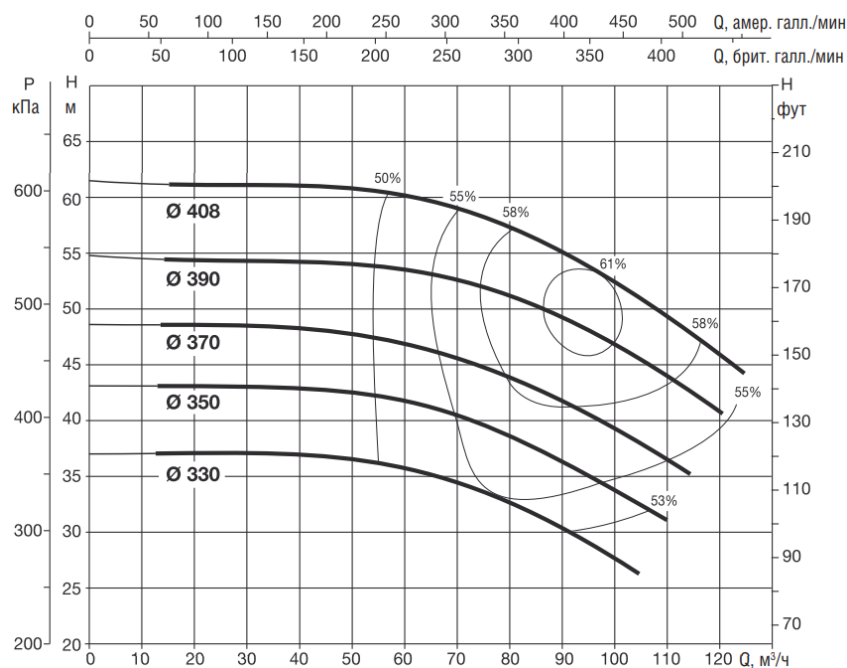
Для інших варіантів конфігурації насосної станції насоси вибираються аналогічно. Напірно-витратні характеристики для насосів серій KDN - 125-400/390; KDN - 100-400/390 та KDN - 80-400/390 наведено на рис. 3.5 а) - в).



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 - Напірно-витратні характеристики насосів з різними діаметрами коліс:

- а) KDN - 112-400/390;
- б) KDN - 100-400/390;
- в) KDN - 80-400/390.

Технічні дані насосів наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Технічні дані моноблочних насосів для 2-го – 4-го варіантів.

KDN-125-400/350	Q , $\text{м}^3/\text{Год}$	0	40	80	120	160	200	240	-	-
	H , м	55	55	55	54,8	54	50,5	44,8	-	-
KDN-100-400/350	Q , $\text{м}^3/\text{Год}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160
	H , м	53	53	53	52,8	52	51,2	50	48	46,5
KDN-80-400/350	Q , $\text{м}^3/\text{Год}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
	H , м	54	54	54	54	54	53,8	53,5	52,5	51,5

Визначаємо потужність, яка споживається насосом для другого – четвертого варіантів конфігурації та вибираємо відповідний двигун.

$$P2 = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{\text{ном}} \cdot H}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot k_3 = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 160 \cdot 53}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,73 \cdot 1} \cdot 1,2 = 35,43 \text{ кВт}$$

Приймаємо асинхронний двигун потужністю 37 кВт з частотою обертання 1480 об/хв.

$$P3 = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{\text{ном}} \cdot H}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot k_3 = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 106,7 \cdot 50}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,72 \cdot 1} \cdot 1,25 = 24,23 \text{ кВт}$$

Приймаємо асинхронний двигун потужністю 30 кВт з частотою обертання 1480 об/хв.

$$P1 = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{\text{ном}} \cdot H}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot k_3 = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 80 \cdot 54}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,71 \cdot 1} \cdot 1,3 = 21,55 \text{ кВт}$$

Приймаємо асинхронний двигун потужністю 22 кВт з частотою обертання 1470 об/хв.

Технічні характеристики двигунів за II-IV варіантами наведено в табл. 3.7[22].

Таблиця 3.7 - Технічні характеристики асинхронного двигуна (2-й варіант-4-й варіант)

Тип двигуна	$P_{2\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi$, -	$I_{\text{ном}}$, А	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$, -	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$, -	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$, -
IE3 225 S4	37,0	1480.0	93.22	0.865	66.5	6.74	2.13	2.86
IE3 200 L4	30,0	1480.0	92.8	0.874	53.31	8.72	3.17	3.53
IE3 180 L4	22,0	1470.0	92.31	0.862	40	7.86	2.63	3.19

3.2 Апроксимація напірних характеристик насосів

Для проведення подальших розрахунків та побудови напірних характеристик при регулюванні швидкості обертання потрібно провести апроксимацію обраних характеристик, представивши їх у вигляді аналітичних залежностей [9].

У загальному випадку H - Q характеристика визначається тричленом другого ступеня [9]:

$$H = a_1 \cdot \gamma^2 + b_1 \cdot \gamma \cdot Q + c_1 \cdot Q^2$$

Для пологої H - Q характеристики, вираз має вигляд квадратичної параболи:

$$H = a_1 \cdot \gamma^2 + c_1 \cdot Q^2,$$

де $\gamma = \omega_i / \omega_{\text{ном}}$ – відносна швидкість обертання робочого колеса насоса;

ω_i та $\omega_{\text{ном}}$ – поточна та номінальна швидкість обертання;

a_1 ; b_1 та c_1 – коефіцієнти апроксимації, які визначаються конструктивними особливостями насосу та розраховуються за паспортними характеристиками.

Враховуючи, що $a_1 = H_0$; $c_1 = -R_b$ отримаємо вираз:

$$H = H_0 \cdot \gamma^2 - R_b \cdot Q^2,$$

H_0 – напір, який розвиває насос при значенні нульової подачі;

R_b – значення внутрішнього опору насосу.

Для розрахунку коефіцієнтів апроксимації використовуємо паспортні характеристики насосів у трьох точках:

- 1) $Q = 0$; $H = H_0$;
- 2) $Q = Q_1$; $H = H_1$;
- 3) $Q = Q_2$; $H = H_2$.

Отримаємо систему рівнянь (3.1):

$$\begin{cases} H_0 = a_1 \cdot \gamma^2 \\ H_1 = a_1 \cdot \gamma^2 + e_1 \cdot \gamma \cdot Q_1 + c_1 \cdot Q_1^2 \\ H_2 = a_1 \cdot \gamma^2 + e_1 \cdot \gamma \cdot Q_2 + c_1 \cdot Q_2^2 \end{cases} \quad (3.1)$$

З цієї системи рівнянь визначаємо коефіцієнти апроксимації характеристик насосу:

$$\begin{cases} a_1 = H_0 \\ e_1 = \frac{H_1 \cdot Q_2}{Q_1 \cdot (Q_2 - Q_1)} - \frac{H_2 \cdot Q_1}{Q_2 \cdot (Q_2 - Q_1)} - \frac{H_0 \cdot (Q_1 + Q_2)}{Q_1 \cdot Q_2} \\ c_1 = \frac{H_2}{Q_2 \cdot (Q_2 - Q_1)} - \frac{H_1}{Q_1 \cdot (Q_2 - Q_1)} + \frac{H_0}{Q_1 \cdot Q_2} \end{cases}$$

Для першої характеристики насосу KDN - 150-400/390/75/4 вибираємо точки на характеристиці:

- $Q = 0 \text{ м}^3/\text{год}; H = H_0 = 54 \text{ м};$
- $Q = Q_1 = 200 \text{ м}^3/\text{год}; H = H_1 = 53 \text{ м};$
- $Q = Q_2 = 450 \text{ м}^3/\text{год}; H = H_2 = 44 \text{ м}.$

Підставляємо в систему рівнянь (3.1) та отримуємо:

$$\begin{cases} a_1 = 54; \\ e_1 = \frac{H_1 \cdot Q_2}{Q_1 \cdot (Q_2 - Q_1)} - \frac{H_2 \cdot Q_1}{Q_2 \cdot (Q_2 - Q_1)} - \frac{H_0 \cdot (Q_1 + Q_2)}{Q_1 \cdot Q_2} = \\ = \frac{53 \cdot 450}{200 \cdot (450 - 200)} - \frac{44 \cdot 200}{450 \cdot (450 - 200)} - \frac{54 \cdot (200 + 450)}{200 \cdot 450} = 8,78 \cdot 10^{-3}; \\ c_1 = \frac{H_2}{Q_2 \cdot (Q_2 - Q_1)} - \frac{H_1}{Q_1 \cdot (Q_2 - Q_1)} + \frac{H_0}{Q_1 \cdot Q_2} = \\ = \frac{44}{450 \cdot (450 - 200)} - \frac{53}{200 \cdot (450 - 200)} + \frac{54}{200 \cdot 450} = -6,89 \cdot 10^{-5}. \end{cases}$$

Для інших характеристик розрахунки зводимо у таблицю 3.8.

Таблиця 3.8 – Визначення коефіцієнтів апроксимації для напірних характеристик насосів

i	Тип насосу	Q_0	Q_1	Q_2	H_0	H_1	H_2	a_{1i}	b_{1i}	c_{1i}
1	KDN - 150-400/390/75/4	0	200	450	54	53	44	54	$8,78 \cdot 10^{-3}$	$-6,89 \cdot 10^{-5}$
2	KDN - 125-400/390/37/4	0	160	240	55	54	44,8	55	0,066	$-4,53 \cdot 10^{-4}$
3	KDN - 100-400/390/30/4	0	80	160	53	52	46,5	53	0,0156	$-3,52 \cdot 10^{-4}$
4	KDN - 150-400/390/22/4	0	50	80	54	53,8	51,5	54	0,0414	$-9,08 \cdot 10^{-4}$

Тоді, характеристики насосів, що представлені аналітичними залежностями мають вигляд:

$$1) H_1 = 54 \cdot \gamma^2 + 8,78 \cdot 10^{-3} \cdot \gamma \cdot Q - 6,89 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2;$$

$$2) H_2 = 55 \cdot \gamma^2 + 6,6 \cdot 10^{-2} \cdot \gamma \cdot Q - 4,53 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2;$$

$$3) H_3 = 53 \cdot \gamma^2 + 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot \gamma \cdot Q - 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2;$$

$$4) H_4 = 54 \cdot \gamma^2 + 4,14 \cdot 10^{-2} \cdot \gamma \cdot Q - 9,08 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2.$$

Апроксимація напірних характеристик дозволить визначити регульовані характеристики насосів при зміні швидкості обертання приводних двигунів.

3.3 Робота окремого насоса з регульованим електроприводом на гідромережу

Розглянемо роботу насосу *KDN-150-400/390/75/4*, регулювання продуктивності якого здійснюється за рахунок зміни частоти обертання робочого колеса. Зміну продуктивності та основні технологічні параметри НС наведено в розділі 3.1.

У якості двигуна насосу використовується асинхронний двигун типу *IE3-280-S4* [20], потужністю: $P_{ном} = 75 \text{ кВт}$; $n = 1480 \text{ об/хв}$. Параметри насосу: подача $Q_{ном} = 320 \text{ м}^3/\text{год}$; тиск $H_{ном} = 50 \text{ м}$.

Враховуючи пологість характеристики насоса, апроксимовану характеристику з достатнім ступенем точності можна представити у вигляді:

$$H = H_0 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - R_{\epsilon} \cdot Q^2 \quad (3.2)$$

де H_0 – напір насоса при $Q = 0$ і $\omega = \omega_{ном}$;

$\omega_{ном}$ – номінальна швидкість електродвигуна, рад/с;

R_{ϵ} – значення внутрішнього опору насоса.

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1480}{60} = 154 \text{ рад/с}$$

$$H = H_0 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - R_{\epsilon} \cdot Q^2 = 54 \cdot \left(\frac{154,99}{154,99} \right)^2 - 3,91 \cdot 10^{-5} \cdot 320^2 = 50 \text{ м}$$

Дані для побудови характеристики насоса представлені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 - Дані для побудови характеристики насоса

$Q, \text{м}^3/\text{год}$	0	50	100	150	200	250	300	350	400
$H, \text{м}$	54	53,9	53,61	53,12	52,44	51,56	50,486	49,2	47,75

Характеристика магістралі визначається наступним виразом:

$$H = H_c + R_c \cdot Q^2$$

де H_c – статичний напір або протитиск, що відповідає закритій засувці при $Q = 0$;

R_c – значення коефіцієнту опору магістралі:

$$R_c = \frac{(H_{ном} - H_c)}{Q_{ном}^2} = \frac{(50 - 35)}{320^2} = 1,46 \cdot 10^{-4}$$

$$H = H_c + R \cdot Q_{ном}^2 = 35 + 1,46 \cdot 10^{-4} \cdot 320^2 = 50 \text{ м}$$

Дані для побудови характеристики магістралі представлено в таблиці 3.10, а самі характеристики насосу та магістралі – на рис.3.6.

Таблиця 3.10 - Дані для побудови характеристики магістралі

$Q, \text{м}^3/\text{год}$	0	50	100	150	200	250	300	350	400
$H, \text{м}$	35	35,37	36,5	38,30	40,86	44,16	48,18	52,9	58,4

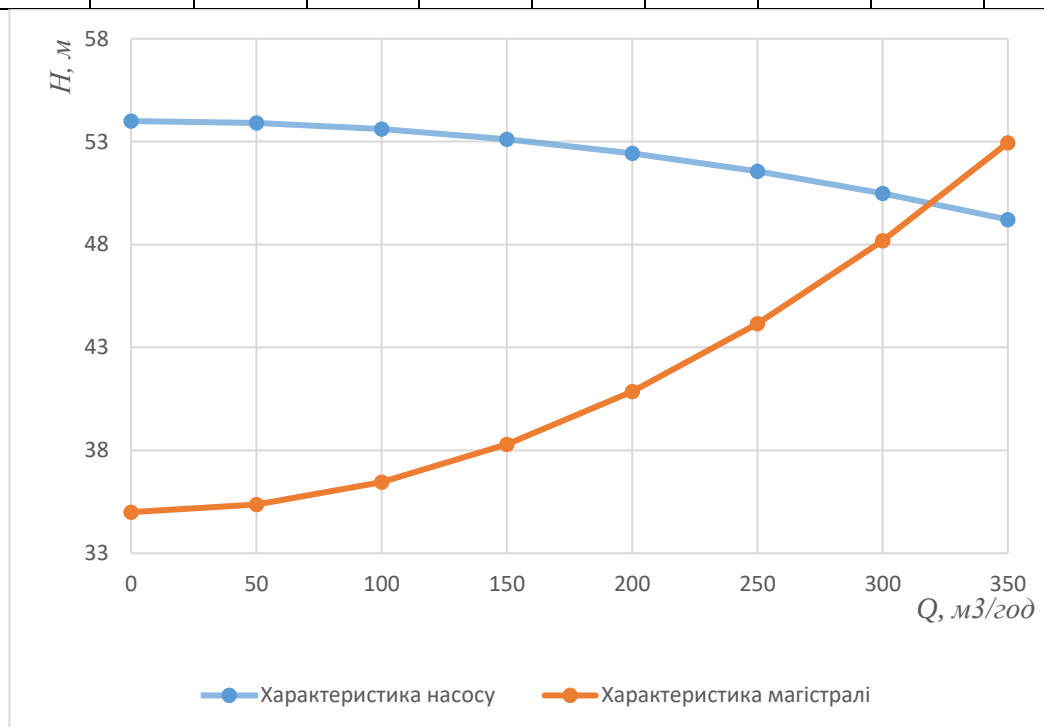


Рисунок 3.6 - Характеристики насосу та магістралі

Зведені дані по параметрам насосу та магістралі представлені у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11- Параметри насосу та магістралі для 1-го варіанту НС

Параметри насосу	Значення	Одиниці вимірювання	Параметри магістралі	Значення	Одиниці вимірювання
$H_{0н}$	54	м	H_c	35	м
$H_{ном}$	50	м	$H_{ном}$	50	м
$Q_{ном}$	320	$\text{м}^3/\text{год}$	$Q_{ном}$	320	$\text{м}^3/\text{год}$
$Rв$	$3,906 \cdot 10^{-5}$		$Rс$	0,000146	
$n_{ном}$	1480	об/хв			
$\omega_{ном}$	154,99	рад/с			

Визначаємо характеристики насосу при зміні частоти обертання робочого колеса, для трьох параметрів відносної швидкості обертання за формулою (3.1) :

$$- \gamma_1 = \omega_1/\omega_{\text{ном}} = 0,98; \quad \gamma_2 = \omega_2/\omega_{\text{ном}} = 0,96; \quad \gamma_3 = \omega_3/\omega_{\text{ном}} = 0,91.$$

Розрахунки зведені до таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Характеристики насосу при зміні частоти обертання приводного двигуна

$Q, \text{ м}^3/\text{год}$	0	50	100	150	200	250	300	350	400
$H_1, \text{ м}$	51,86	51,76	51,47	50,98	50,30	49,42	48,35	47,08	45,61
$H_2, \text{ м}$	48,74	48,98	48,88	48,44	47,65	46,51	45,04	43,21	41,05
$H_3, \text{ м}$	44,72	44,62	44,33	43,84	43,15	42,28	41,20	39,93	38,47
$H_{\text{маг}}, \text{ м}$	35,00	35,37	36,46	38,30	40,86	44,16	48,18	52,94	58,44

За даними таблиці 3.1 побудовані номінальна та регульовані напірні характеристики насосу, які зображено на рис.3.7.

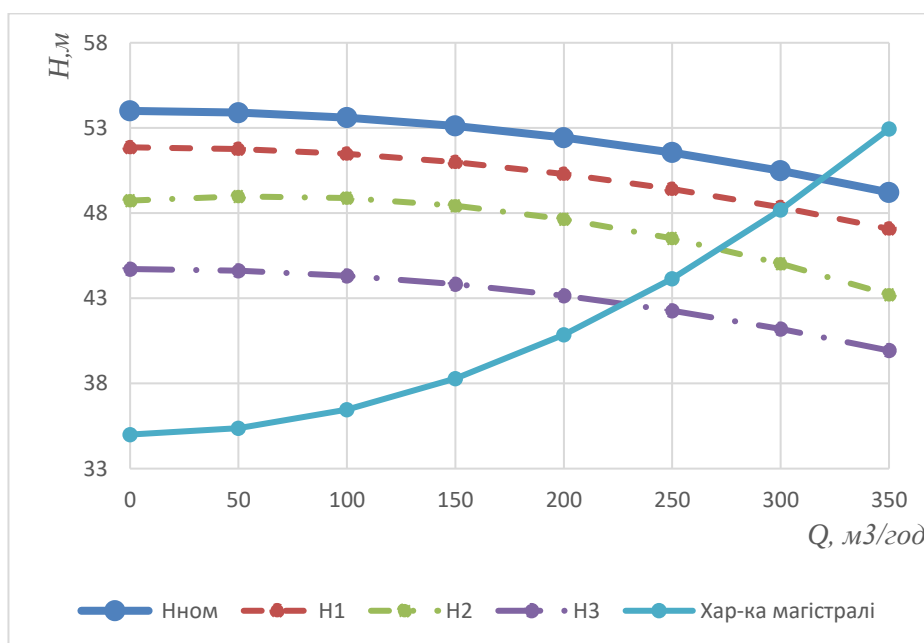


Рисунок 3.7 – Характеристики насосу при змінній швидкості обертання:

$H_{\text{ном}}$ – характеристика насосу при номінальній швидкості обертання;

H_1 - характеристика насосу при $\gamma_1 = \omega_1/\omega_{\text{ном}} = 0,98$; H_2 - характеристика насосу при $\gamma_2 = \omega_2/\omega_{\text{ном}} = 0,96$; H_3 - характеристика насосу при $\gamma_3 = \omega_3/\omega_{\text{ном}} = 0,91$.

3.4 Сумісна робота регульованого та нерегульованого насосів на гідромережу

Розглянемо роботу двох однакових насосів *KDN-125-400/390/37/4* при паралельному підключенні на спільну гідромережу. При цьому регульованим електроприводом обладнаний тільки один з насосів, що відповідає другому варіанту конфігурації НС : 1 РГ+1 НРГ.

Апроксимовану характеристику такого насосу можна представити у вигляді:

$$H = H_0 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - R_6 \cdot Q^2 = 55 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - 7,813 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2.$$

Дані для побудови напірних характеристик насосів наведено в таблиці 3.13 для наступних випадків:

- робота першого та другого нерегульованого насосу – $H_{1,2НРГ}$;
- паралельна робота двох нерегульованих насосів на спільну гідромережу – $H_{\Sigma 1+2, НРГ}$;
- робота одного регульованого насосу при відносних швидкостях обертання $\gamma_1 = 0,98 - H_{2РГ}$; $\gamma_2 = 0,96 - H_{2РГ}$; $\gamma_3 = 0,91 - H_{2РГ}$.

Таблиця 3.13 - Дані для побудови напірних характеристик насосів

Q, м³/год	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$H_{1,2НРГ},$ м	55	54,97	54,88	54,72	54,5	54,22	53,9	53,5	53	52,47	51,9
$H_{\Sigma 1+2},$ НРГ, м	55	55	54,97	54,9	54,88	54,8	54,7	54,6	54,5	54,35	54,2
$H_{2РГ},$ м $\gamma=0,98$	52,822	52,79	52,7	52,54	52,32	52,04	51,7	51,3	50,82	50,29	49,7
$H_{2РГ},$ м $\gamma=0,96$	49,638	49,74	49,73	49,61	49,37	49,02	48,6	48	47,28	46,47	45,6
$H_{2РГ},$ м $\gamma=0,91$	45,546	45,51	45,42	45,26	45,05	44,76	44,4	44	43,55	43,01	42,4
Q, м³/год	220	240	260	280	300	320	360	400			
$H_{\Sigma 1+2},$ НРГ, м	54	53,88	53,6	53,47	53,2	53	52,47	51,88			

Напірні характеристики насосів приведено на рис.3.8. Якщо регулювання швидкості обертання однієї з насосних установок не застосовується: $Q_1 = Q_2$ та сумарна продуктивність насосної установки: $Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 = Q_3$. Такий режим роботи відповідає точці A на кривій 3. Якщо змінюється швидкість обертання РГН, наприклад, до значення $\gamma_1 = 0,98$, то такий режим відповідає кривій 2' і сумарна продуктивність буде визначатися точкою A' на кривій 3'. Сумарна продуктивність насосної установки $Q_{\Sigma} = Q'_3$

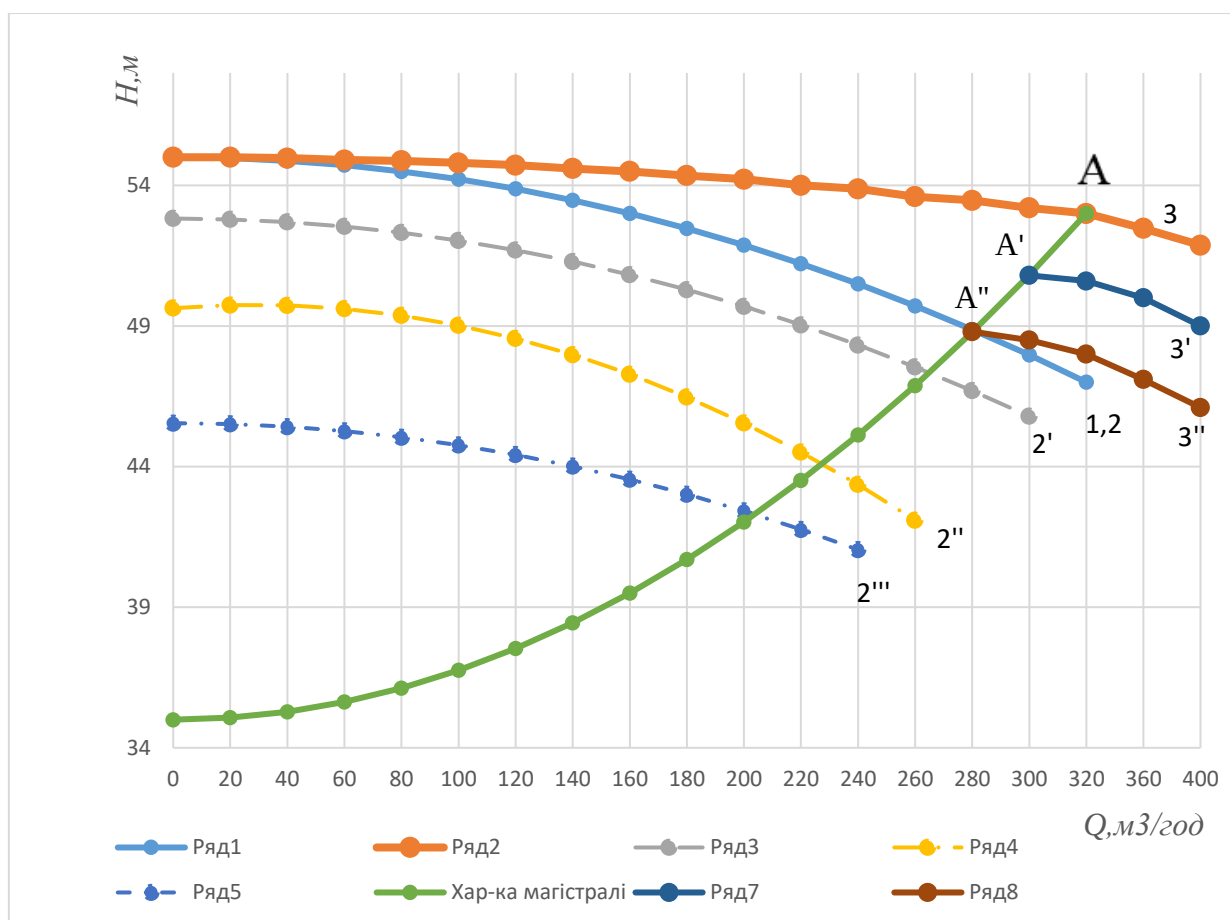


Рисунок 3.8 – Паралельна робота двох однакових насосів

При подальшому зниженні швидкості регульованого електроприводу, буде знижуватися продуктивність другого насоса. Цей режим зображено точкою A'' на кривій 3, для $\gamma_2 = 0,96$, $Q_{\Sigma} = Q''_3$. В цій точці спостерігається відносна критична швидкість обертання, для якої можливо записати:

$$H_0 - R_g \cdot Q_1^2 = H_c + R_c \cdot Q_1^2.$$

$$\text{Тоді: } Q = \sqrt{\frac{H_0 - H_c}{R_g + R_c}}.$$

Для точки A'' напори, що створюються регульованим та нерегульованим насосами будуть рівні. Якщо врахувати тиск, який розвиває регульований насос:

$H_p = \gamma_k^2 \cdot H_0$, то отримаємо вираз:

$$\gamma_k^2 \cdot H_0 = H_0 - R_g \cdot \frac{H_0 - H_c}{R_g + R_c}.$$

З цього виразу отримаємо відносну критичну швидкість обертання для регульованого насосу:

$$\gamma_k = \sqrt{\frac{\rho + h}{1 + \rho}}. \quad (3.3)$$

Цей вираз показує, що діапазон регулювання швидкості насосу, при паралельній роботі з нерегульованим насосом, залежить від відносних значень протитиску (h) та опору мережі (ρ). Він відрізняється від такого ж діапазону для окремо працюючого насосу, що залежить тільки від протитиску: $\gamma_k = \sqrt{h}$.

Якщо сумісно працює декілька нерегульованих насосів (n) та один регульований, вираз (3.3) буде мати вигляд:

$$\gamma_k = \sqrt{\frac{\rho \cdot n^2 + h}{1 + \rho \cdot n^2}}. \quad (3.4)$$

Проведені дослідження [9] показують, що діапазон регулювання частоти обертання для регульованого насосу знижується при збільшенні паралельно працюючих нерегульованих насосів. Наприклад, у таблиці 3.14 наведено значення цього діапазону в залежності від кількості паралельно працюючих однакових нерегульованих насосів та одного регульованого насосу.

Таблиця 3.14 – Визначення діапазону регулювання швидкості обертання при паралельній роботі регульованого та нерегульованих насосів

Кількість НРН, n	Відносна критична швидкість, γ_k	Діапазон регулювання, $D \%$	Відносна критична швидкість, γ_k	Діапазон Регулювання, $D \%$	Відносна критична швидкість, γ_k	Діапазон регулювання $D, \%$
	$h=0.6; \rho=1.44$		$h=0.7; \rho=1.44$		$h=0.8; \rho=1.44$	
1	0,91	8,6	0,936	6,3	0,959	4,2
2	0,97	3,1	0,977	2,2	0,985	1,5
3	0,985	1,5	0,989	1,08	0,993	0,7
4	0,99	0,9	0,994	0,6	0,996	0,4

Аналіз проведених розрахунків свідчить, що при збільшенні паралельно працюючих нерегульованих насосів поряд з одним регульованим, у регульованого насоса зменшується діапазон регулювання. В такому випадку, регулювання швидкості обертання може бути застосовано до (10-12)% вниз від номінальної.

3.5 Оцінка економічної ефективності запропонованих варіантів конфігурації насосної станції

Проаналізуємо зниження споживання електроенергії при регульованому електроприводі порівняно з нерегульованим для насосу *KDN-150-400/390/75/4*. Визначимо потужність, яка витрачається насосним агрегатом для різних способах регулювання продуктивності. Для цього скористаємось даними про споживання потужності електроприводом насосу при частотному та дросельному регулюванні (у відносних одиницях) в залежності від витрат рідини і статичного напору [3]. Вирази для розрахунків потужності для різних способів регулювання мають наступний вигляд:

- при дросельному регулюванні:

$$P' = \frac{[\mu_{0c} + (1 - \mu_{0c}) \cdot Q'] \cdot (1 + a \cdot s_{ном})}{1 - s_{ном}} ;$$

- при частотному регулюванні:

$$P' = [\mu_{0c} \cdot A^3 + (1 - \mu_{0c}) \cdot A^2 \cdot Q'] \cdot \left[1 + \frac{s_{ном} \cdot (1+a)}{(1-s_{ном}) \cdot A} \right],$$

де μ_{0c} – статичний момент на валу для $Q' = 0$; $s_{ном}$ – номінальне ковзання (у розрахунках $s_{ном} = 0,04$; $a = 1$).

$$A = \sqrt{h_c + Q'^2 \cdot (1 - h_c)};$$

$$h_c = \frac{H_c}{H_{0н}} = \frac{35}{50} = 0,7.$$

Залежність $P' = f(Q')$ при різному регулюванні потужності наведено на рис. 3.9.

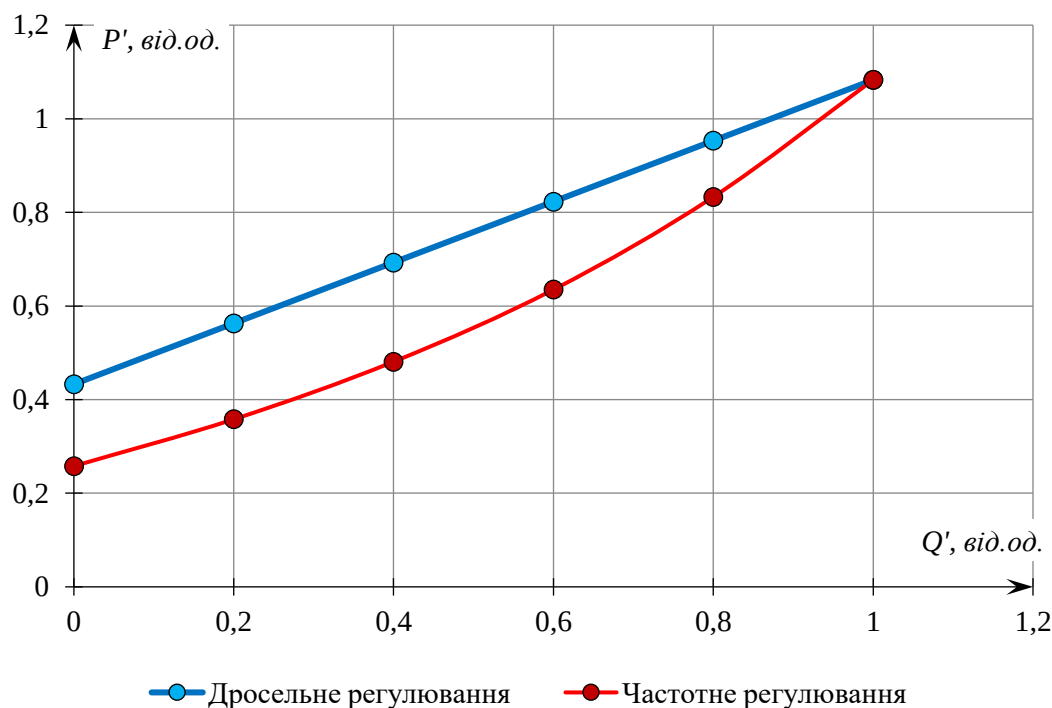


Рисунок 3.9 - Залежність $P' = f(Q')$ при різному регулюванні потужності

Потужність, яка споживається насосною установкою з мережі:

$$P_1 = \frac{P_{мех}}{\eta} = \frac{75}{0,9322} = 80,13 \text{ кВт},$$

де $P_{мех}$ – потужність на валу двигуна насоса; η – ККД двигуна; M_c – статичний момент навантаження на валу двигуна.

В таблиці 3.15 наведено розрахункова економія споживаної енергії при частотному способі регулювання.

Таблиця 3.15 - Розрахункова економія енергії, що споживається насосним агрегатом при частотному регулюванні

Час	$Q, \text{ м}^3/\text{год}$	$Q/Q_{\text{ном}},$ відн. од.	$P/P_{\text{ном}}$ (дрос), відн. од	$P/P_{\text{ном}}$ (част), відн.од.	$\Delta P,$ відн.од.	$\Delta P, \text{ кВт}$	$\Delta E, \text{ грн}$
0..1	128	0,40	0,53	0,71	0,18	14,42	94,62
1..2	128	0,40	0,53	0,71	0,18	14,42	94,62
2..3	128	0,40	0,53	0,71	0,18	14,42	94,62
3..4	134	0,42	0,55	0,73	0,18	14,42	94,62
4..5	134	0,42	0,55	0,73	0,18	14,42	94,62
5..6	166	0,52	0,58	0,77	0,19	15,22	99,87
6..7	227	0,71	0,69	0,89	0,20	16,03	105,13
7..8	320	1,00	1,08	1,08	0,00	0,00	0,00
8..9	320	1,00	1,08	1,08	0,00	0,00	0,00
9..10	282	0,88	0,91	1,01	0,10	8,01	52,57
10-11	166	0,52	0,58	0,77	0,19	15,22	99,87
11-12	134	0,42	0,55	0,73	0,18	14,42	94,62
12-13	134	0,42	0,55	0,73	0,18	14,42	94,62
13-14	134	0,42	0,55	0,73	0,18	14,42	94,62
14-15	134	0,42	0,55	0,73	0,18	14,42	94,62
15-16	134	0,42	0,55	0,73	0,18	14,42	94,62
16-17	166	0,52	0,58	0,77	0,19	15,22	99,87
17-18	227	0,71	0,69	0,89	0,20	16,03	105,13
18-19	320	1,00	1,08	1,08	0,00	0,00	0,00
19-20	320	1,00	1,08	1,08	0,00	0,00	0,00
20-21	282	0,88	0,91	1,01	0,10	8,01	52,57
21-22	282	0,88	0,91	1,01	0,10	8,01	52,57
22-23	227	0,71	0,69	0,89	0,20	16,03	105,13
23-24	166	0,52	0,58	0,77	0,19	15,22	99,87
	Разом					277,25	1818,76

На рис. 3.9 представлені результати розрахунків економії енергії, що споживається насосом.

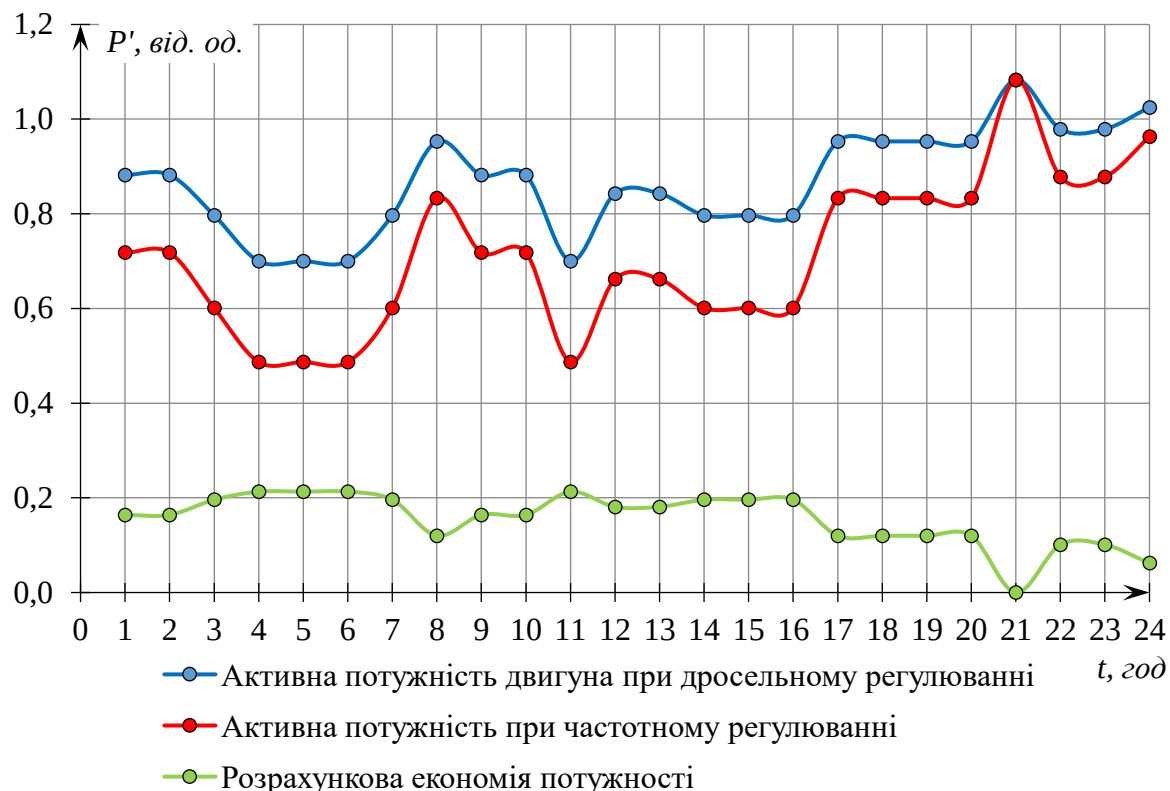


Рисунок 3.9 - Результати розрахунків економії потужності, що споживається насосом при частотному регулюванні

Якщо вважати, що зміна потужності протягом 1 години незначна, по табл. 3.11 можна розрахувати добову економію електроенергії при переході на частотне регулювання, яка склала 1 818 грн. Якщо не враховувати збільшення витрат води у вихідні дні, а також сезонні зміни її витрат, можна оцінити річну економію електроенергії у 663 570 грн.

Для варіантів конфігурації насосної станції проведемо оцінку економічної ефективності та на її основі оберемо кращу конфігурацію насосної станції. Оцінка економічної ефективності включає визначення величини капіталовкладень, експлуатаційних витрат, показників економічної ефективності.

Скористаємося формулою для визначення приведених витрат:

$$B_{ni} = \Pi_{ei} + E_n \cdot K_i, \quad (3.4)$$

де $\Pi_{\text{вi}}$ - поточні річні витрати за i -м варіантом;

K_i – загальні капіталовкладення за i -м варіантом;

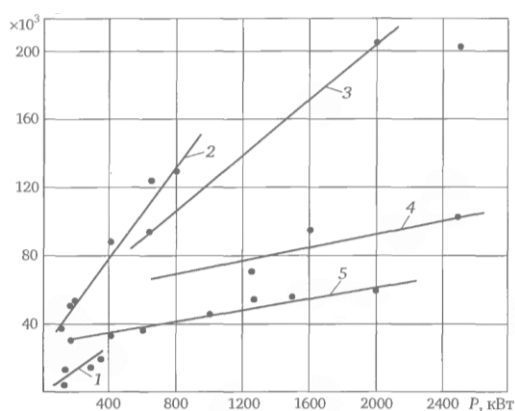
E_n - значення нормативного коефіцієнту ефективності капіталовкладень.

Капітальні вкладення включають до свого складу вартість обладнання ($B_{\text{обл}}$), додаткові витрати на монтаж ($B_{\text{м}}$), пусконаладжувальні роботи ($B_{\text{пн}}$) та доставку ($B_{\text{д}}$):

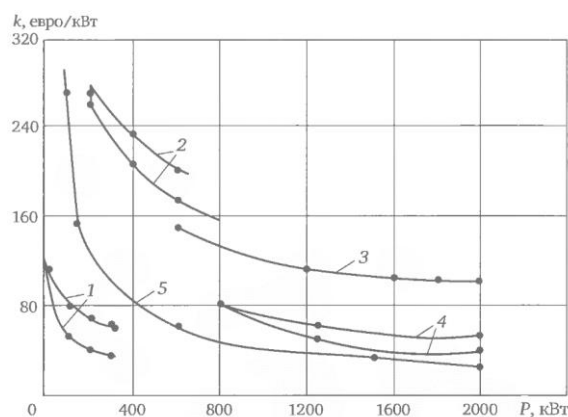
$$K = B_{\text{обл}} + B_{\text{д}} + B_{\text{м}} + B_{\text{пн}}.$$

Орієнтовно, вартість додаткових витрат приймається у відсотках загальної вартості обладнання.

Величина капіталовкладень, які зумовлені використанням регульованого електроприводу насосів, приймається в залежності від виду електроприводу і його потужності. Для цього скористаємося графіками, які наведені на рис.3.10 а)-б).



а)



б)

Рисунок 3.10 – Капіталовкладення а) та питома вартість б) використання перетворювачів і пристроїв керування наступними видами регульованого електроприводу: 1-низьковольтні частотні перетворювачі; 2-високовольтні ЧП в яких застосовується подвійна трансформація напруги; 3-високовольтні ЧП без трансформації; 4-високовольтні ЧП, що виконані по системі вентильного електродвигуна; 5 – варіатори гідравлічні.

Визначення капіталовкладень за варіантами зведено у таблицю 3.16.

Таблиця 3.16 - Розрахунок капіталовкладень за варіантами конфігурації НС

№	Найменування обладнання	Кіл-ть, шт	Ціна, грн	Всього, грн
B1	Насосна установка <i>KDN-150-400/390/75/4</i>	1	263186	263186
	Перетворювач частоти Altivar 75кВт	1	276709,4	276709,4
	Резерв	1	55299,2	55299,2
	Всього обладнання			595194,6
	Витрати на доставку, монтаж, п/н роботи (приймається 25% вартості обладнання)			148798,7
	Разом за варіантом 1			743993,3
B2	Насосна установка <i>KDN-125-400/390/37/4</i>	2	240495,2	480990,4
	Перетворювач частоти Altivar 37 кВт	1	98994,5	98994,5
	Всього обладнання			579984,9
	Витрати на доставку, монтаж, п/н роботи (приймається 25% вартості обладнання)			144996,2
	Разом за варіантом 2			724981,1
B3	Насосна установка <i>KDN-100-400/390/30/4</i>	3	197208	591624
	Перетворювач частоти Altivar 30 кВт	1	76252	76252
	Всього обладнання			667876
	Витрати на доставку, монтаж, п/н роботи (приймається 25% вартості обладнання)			166969
	Разом за варіантом 3			834845
B4	Насосна установка <i>KDN-80-400/390/22/4</i>	4	131692	526768
	Перетворювач частоти Altivar 22 кВт	2	36180,1	72360,2
	Всього обладнання			599128,2
	Витрати на доставку, монтаж, п/н роботи (приймається 25% вартості обладнання)			149782,1
	Разом за варіантом 4			748910,3

До складу поточних витрат входить: вартість електроенергії, що споживається ($B_{ел}$); вартість витоків і невиробничих витрат води ($B_{вв}$); річні амортизаційні відрахування (A); вартість транспорту, витоків і невиробничих витрат стічної води у системі водовідведення ($B_{тв}$); річні витрати, що задіяні на технічне обслуговування обладнання ($B_{то}$); та визначаються за формулою:

$$\Pi_{\varepsilon} = B_{ел} + B_{вв} + B_{тв} + B_{то} + A.$$

Вартість спожитої електричної енергії насосною установкою визначається за річним споживанням (W_p) та діючим тарифом на електричну енергію (C_0):

$$B_{ел} = W_p \cdot C_0.$$

Споживання електроенергії за рік насосною установкою, що працює з регульованим електроприводом, включає в себе енергію, що споживається на валу двигуна, втрати в частотному перетворювачі та двигуні, що пов'язані з несинусоїдальністю перетвореного струму:

Вартість витоків та невиробничих витрат води в системі водовідведення розраховується за величиною Q_v та відповідними тарифами (C_v) та водовідведення ($C_{від}$):

$$B_{vv} = Q_v \cdot C_v ;$$

$$B_{тв} = Q_v \cdot C_{від}.$$

Витрати, що спрямовані на технічне обслуговування обладнання визначаються на підставі вартості ремонтних матеріалів, заробітної плати ремонтних робітників (основної та додаткової) та інших витрат.

Основна та додаткова ЗП ремонтних робітників враховує відрахування на соціальні потреби:

$$Z_{mo} = Q_{mo} \cdot l_c \cdot K_d \cdot \left(1 + \frac{H_{соц}}{100}\right) ,$$

де Q_{mo} – річна трудомісткість робіт по технічному обслуговуванню;

l_c – тарифна ставка робітників (середня за годину), грн./год;

K_d – значення коефіцієнту додаткової ЗП, що враховує премії та інші види грошових виплат. Орієнтовно приймається (1,25-1,35);

H – значення нормативу єдиного соціального внеску.

Вартість ремонтних матеріалів в наближених розрахунках приймається у розмірі 35% від величини Z_{mo} , а вартість інших витрат – у розмірі 20% від суми ЗП та вартості ремонтних матеріалів.

Амортизаційні відрахування за рік залежать від капіталовкладень та норми річною амортизації (H_a), яка складає 10%.

$$A = \frac{K \cdot H_{a\%}}{100}.$$

Зводимо отримані результати розрахунку поточних витрат до таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Результати розрахунків поточних витрат за варіантами

№ вар.	$B_{\text{ел}}$, т.грн	$B_{\text{вв}}$, т.грн	$B_{\text{тв}}$, т.грн	$B_{\text{то}}$, т.грн	A , т.грн	Всього, т.грн
В1	2324,778	111,920	96,920	161,000	74,399	2769,017
В2	2461,560	115,400	100,040	142,400	72,498	2891,898
В3	2458,080	115,880	110,160	135,480	83,484	2903,085
В4	2328,552	112,680	106,160	138,280	74,891	2760,563

Для визначення доцільності інвестиційних вкладень застосуємо показник еквівалентних річних витрат ЕРВ (еквівалентних річних витрат):

$$EPB = \frac{K + \sum_{t=1}^n \frac{3_t}{(1+i/100)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i/100)^t}},$$

де $1/(1+i/100)^t$ – значення фактору теперішньої вартості [29].

Він застосовується тоді, коли проект оцінюється лише за витратами, якщо неможливо чи дуже складно розрахувати додатковий грошовий потік. За кращий визнається проект, який має найменші витрати та має бажаний результат. Термін служби порівнюваних проектів складає 20 років, а ставка дисконту може бути прийнятою на рівні 12%.

Для першого варіанту:

$$EPB_{\text{1вар.}} = \frac{743,993 + 2769,017 \cdot 6,42}{6,42} = 2884,904 \text{ тис.грн.}$$

Визначення показників ЕРВ за іншими варіантами конфігурації насосної станції зведено до таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – ЕРВ за варіантами конфігурації НС

№ вар.	Капіталовкладення (K), тис.грн	Поточні витрати, ($\Pi_{\text{в}}$), тис.грн	Еквівалентні річні витрати (EPB), тис.грн
B1	743,993	2769,017	2884,904
B2	724,981	2891,898	3004,823
B3	834,845	2903,085	3033,123
B4	748,910	2760,563	2877,216

Виходячи з розрахунків, за показником еквівалентних річних витрат рівнооекономічними являються перший та четвертий варіанти. Враховуючи кращі технічні характеристики, вимоги до конкретної системи водопостачання та можливості забезпечення її подальшого розвитку приймаємо варіант № 4.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

4.1 Регулювання рівню напору в магістралі НС

Для проведення досліджень режимів роботи НУ системи водопостачання з регульованим електроприводом розглянемо насос *KDN - 150-400/390/75/4*, асинхронний двигун *IE3 280S4* потужністю 75 кВт та перетворювач частоти *Altivar ATV630D75N4*.

Модель такої системи можливо представити у вигляді структурної схеми (рис. 4.1).

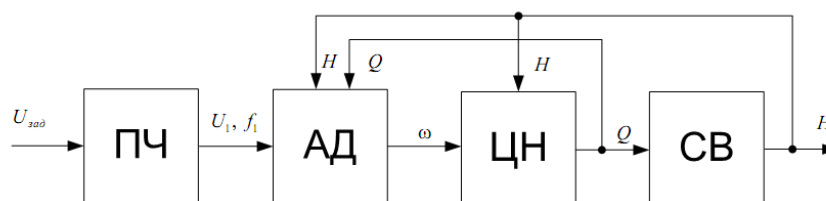


Рисунок 4.1 – Модель насосної установки системи водопостачання

На підставі цієї моделі складаємо структурну схему САК, яка здійснює регулювання рівня напору в магістралі НС (рис.4.2). Головним елементом цієї схеми є об'єкт керування (ОК), у якості якого виступає відцентровий насос.

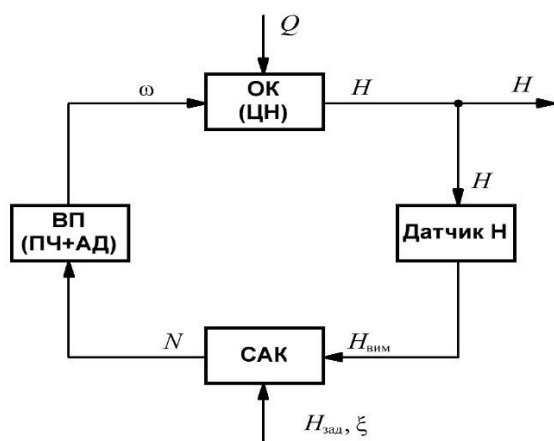


Рисунок 4.2 – Регулювання рівню напору в магістралі насосної станції

Виконавчим пристроєм (ВП) є асинхронний двигун, підключений до перетворювача частоти. В схемі передбачено датчик напору (Н) та систему автоматичного керування (САК) рівнем напору. Зміна подачі рідини (Q) приводить до зміни напору ($H_{\text{вим}}$) в магістралі НС. Нове значення напору поступає на вхід блоку САК. В цьому блоці створюється керуючий

вихідний сигнал (N), який залежить від величини помилки керування (ξ). Сигнал N надходить на вхід ВП, в якому отримується відповідне значення зміненої швидкості обертання (ω) насосної установки.

Відповідний алгоритм роботи реалізовано за допомогою імітаційного моделювання в програмі Simulink Matlab. В наступних розділах розглянуто розробку комп'ютерних моделей ОК, ВП та блоку автоматичного керування.

4.2 Комп'ютерні імітаційні моделі елементів структурної схеми САК

Комп'ютерна імітаційна модель (KIM) об'єкту керування. Для даної схеми об'єктом керування являється насос $KDN - 150-400/390/75/4$, технічні параметри та напірна характеристика насоса наведені у розділі 3.

Аналітичний вираз характеристики насоса представлено поліномом другого порядку:

$$\begin{aligned} H(\omega, Q) &= (a_0 + a_1 \cdot Q + a_2 \cdot Q^2) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном.}}} \right)^2 = \\ &= (53,453 + 21,81 \cdot 10^{-3} \cdot Q - 0,11 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2) \cdot \left(\frac{\omega}{154,991} \right)^2, \end{aligned} \quad (4.1)$$

де H – значення величини напору; Q – значення подачі; ω – кутова швидкість обертання валу АД; $\omega_{\text{ном}}$ – номінальна кутова швидкість обертання валу двигуна; a_0, a_1, a_2 – значення коефіцієнтів рівняння регресії.

За виразом (4.1) побудовано графіки Q - H характеристик насоса та графіки апроксимованих залежностей при різних значеннях частоти обертання валу двигуна (рис.4.3).

Тобто, математична модель об'єкту керування представлена у вигляді аналітичного виразу (4.1). Таку модель можна представити у вигляді підсилювальної, безінерційної ланки.

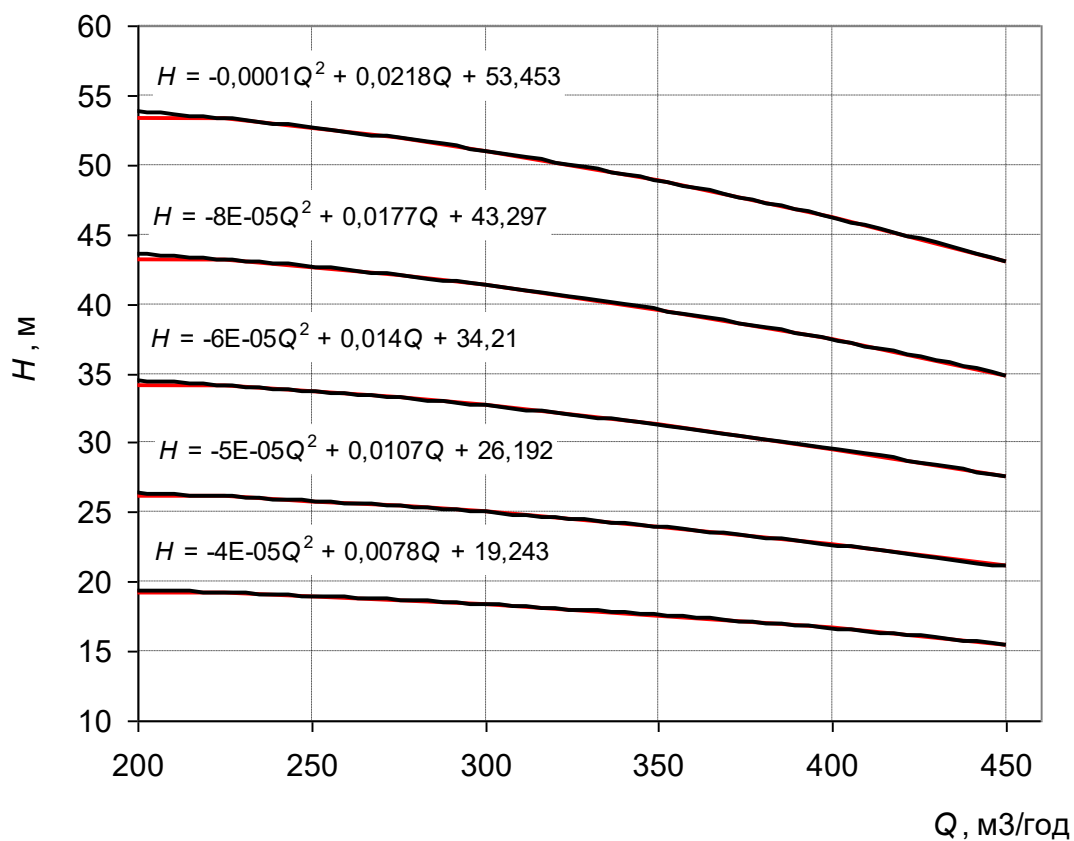


Рисунок 4.3 - Графіки НХ насоса при регулюванні частоти обертання та графіки апроксимованих залежностей

В програмі Matlab Simulink створено комп'ютерну імітаційну модель блоку насосної установки, яку наведено на рис.4.4.

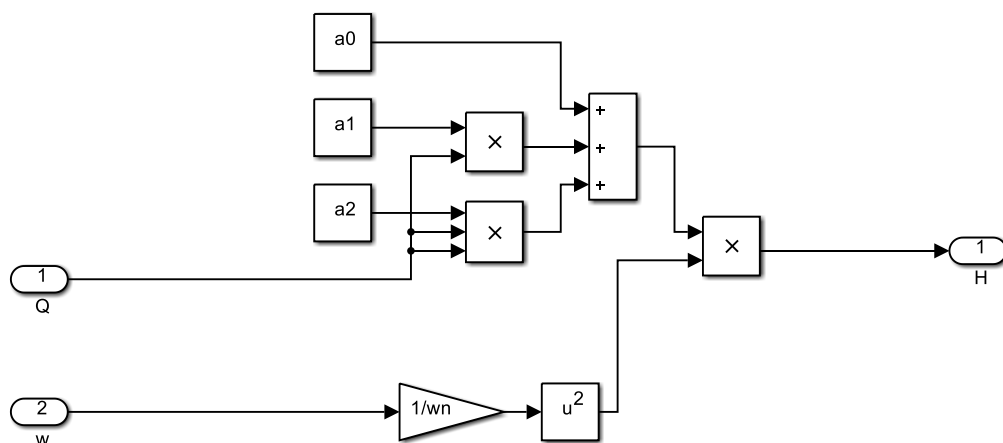


Рисунок 4.4 - Модель блоку «Насосна установка»

КІМ виконавчого пристрою. Комп'ютерну модель виконавчого пристрою САК, структурна схема якої зображена на рис. 4.5, можна умовно поділити на два блоки: імітаційна модель перетворювача частоти та імітаційна модель асинхронного двигуна.

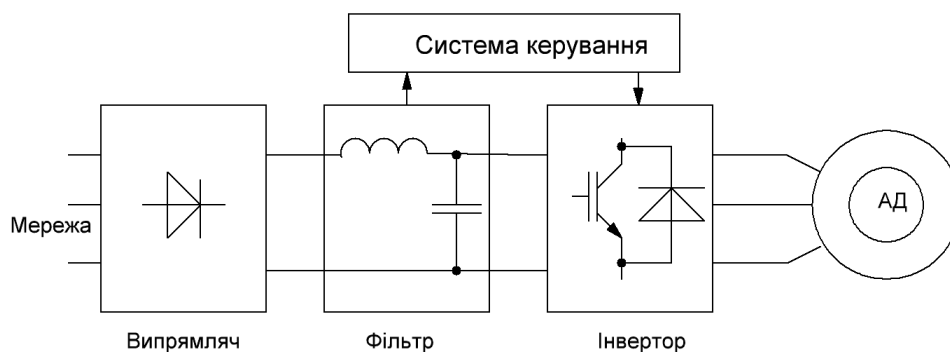


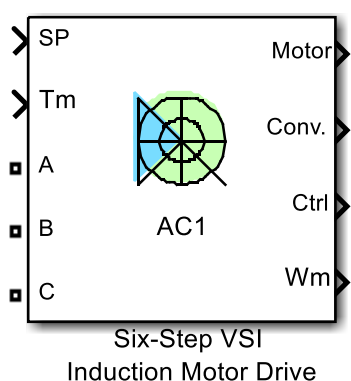
Рисунок 4.5 - Структурна схема ЧП АЕП

Вибір алгоритму керування швидкістю обертання валу АД (скалярний або векторний) буде впливати на модель асинхронного частотного електроприводу.

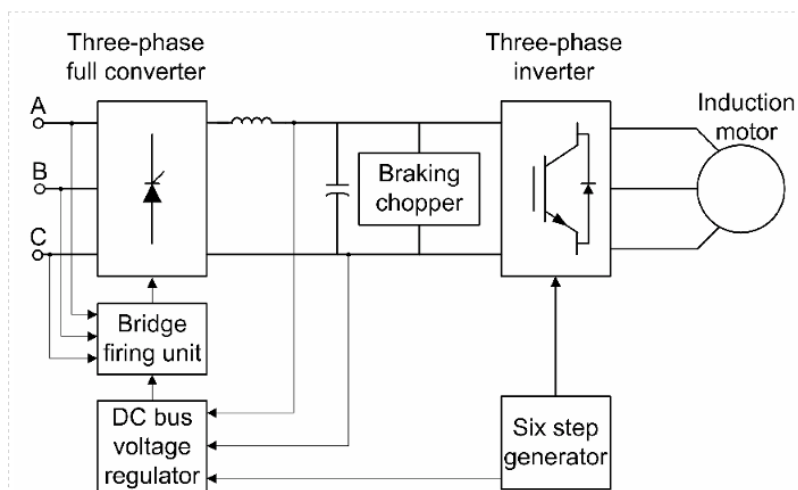
Відзначимо, що побудова детальної імітаційної моделі ЧП асинхронного електроприводу являється досить складною інженерною задачею. Це пояснюється високою складністю математичного опису процесів, які відбуваються в ЧП через наявність великої кількості нелінійних елементів. Також складною задачею є побудова математичної моделі АД, процеси в якому описується системою диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

Для проведення досліджень режимів роботи ЧП асинхронного електроприводу у середовищі Simulink Matlab скористуємося блоками «Six-Step VSI Induction Motor Drive» та «Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive» (для скалярного та векторного керування) бібліотеки SimPowerSystems. В основу цих блоків покладена математична модель ПЧ та модель асинхронного двигуна, яка базується на основі диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

Зовнішній вигляд зазначених блоків наведено на рис. 4.6-4.7 а) та структурну схему силової частини – на рис. 4.6 – 4.7 б).

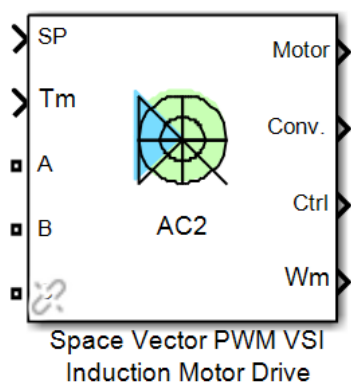


a)

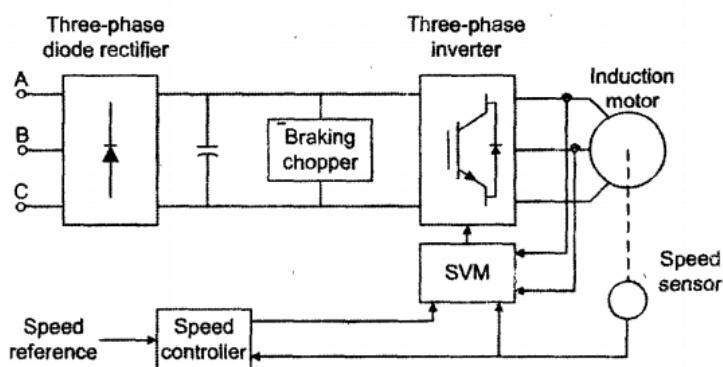


б)

Рисунок 4.6 - Зовнішній вигляд - а) та структурна схема силової частини - б) блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive»



a)



б)

Рисунок 4.7 - Зовнішній вигляд- а); структурна схема силової частини - б) блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive»

До силової частини блоку скалярного керування входить трифазний мостовий керований випрямляч, система керування ланцюга скиду енергії гальмування виконавчого АД, блок генерування імпульсів керування, АД з КЗ ротором, трифазний інвертор і система керування інвертором.

Діалогові вікна, в яких виконується налаштування параметрів блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive» представлено на рис. 4.8.

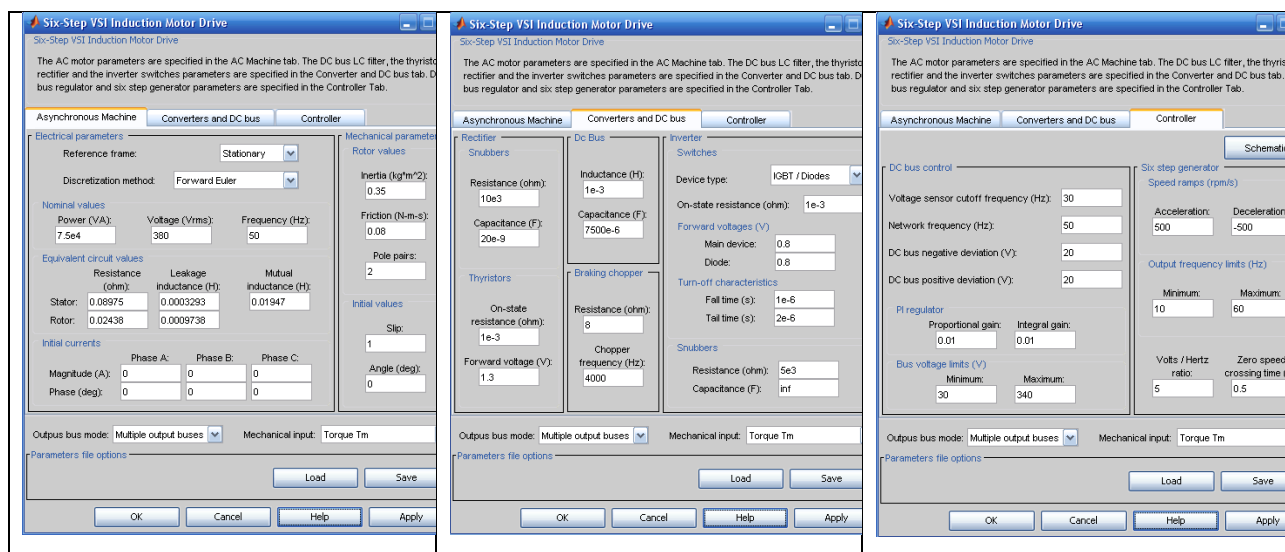


Рисунок 4.8 – Діалогові вікна для налаштувань параметрів блоку «Six-Step Induction Motor Drive»

Узагальнена принципова схема, а також діалогові вікна для налаштування параметрів блоку векторного керування є аналогічними.

Для визначення параметрів комп'ютерної моделі АД IE3 280S4 потужністю 75 кВт була використана функції Matlab, що позначається «power_Asynchronous Machine Params» та дозволяє визначати параметри моделі АД за паспортними даними, використовуючи зручний графічний інтерфейс.

Тоді вираз для механічної характеристики запишеться у вигляді:

$$M_c = M_0 + (M_{ном.} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном.}} \right)^2 = 14,511 + 469,432 \cdot \left(\frac{\omega}{154,991} \right)^2,$$

де M_c – значення механічного моменту на валу двигуна;

$M_{ном}$ – значення номінального моменту;

M_0 – значення моменту двигуна у режимі холостого ходу.

$$M_0 = 0,03M_{ном} = 0,03 \cdot 483,95 = 14,52 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Модель блоку «АЧП» зображено на рис. 4.9.

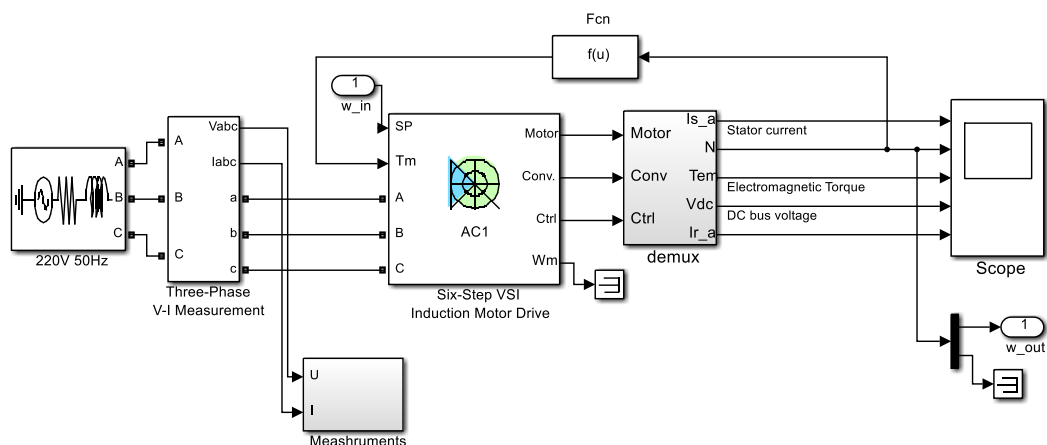


Рисунок 4.9 - Модель для блоку «АЧП»

4.3 Синтез САК напором в магістралі насосної станції

В роботі розглянуто підхід, який засновано на використанні пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ПІД). Зважаючи на те, що для цілей керування рівнем напору в магістралі НС швидкість перехідного процесу не є визначальною, нехтуємо використанням диференційної складової ПІД закону регулювання.

Частотно-регульований асинхронний електропривод можна описати, як комбінацію аперіодичної ланки першого порядку та ланки із чистим запізненням.

В результаті передаточна функція такого електроприводу набуває наступної форми:

$$W_{\times I}(\delta) = \frac{k_i}{T_1 p + 1} e^{-p\tau}, \quad (4.3)$$

де k_m – значення коефіцієнту підсилення;

T_1 – значення постійної часу.

Значення величин k_m та T_1 можливо визначити розрахунковим шляхом або експериментально. В даному випадку величини приймають такі значення: $k_m = 1$; $T_1 = 0,093$ с.

Аналіз виразу, що описує об'єкт керування (Q - H характеристику насоса), показує, що нелінійність його математичної моделі зумовлена квадратичною залежністю напору від відносної швидкості обертання. Для спрощення цієї

залежності доцільно застосувати метод лінійної регресії. Вираз для лінеаризованої математичної моделі об'єкту керування можна записати у вигляді:

$$H(Q, \omega) = (a_0 + a_1 \cdot Q + a_2 \cdot Q^2) \cdot \left[b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном.}} \right) \right] =$$

$$= (53,453 + 21,81 \cdot 10^{-3} \cdot Q - 0,11 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2) \cdot \left[-0,681 + 1,71 \cdot \left(\frac{\omega}{154,991} \right) \right] \quad (4.4)$$

Головною метою синтезу ПІ-регулятора є визначення коефіцієнтів пропорційної та інтегральної складових. Для цього використовуються кілька підходів:

1. Ручний підбір коефіцієнтів для пропорційної та інтегральної складових.
2. Інженерні методи, які базуються на застосуванні таблиць і довідкових даних.
3. Синтез ПІ-регулятора за допомогою комп'ютерного моделювання системи автоматичного керування.

У даній роботі було використано підхід, що ґрунтується на третьому методі. На рисунку 4.10 представлено структурну схему лінеаризованої моделі САК для регулювання напору магістралі насосної станції.

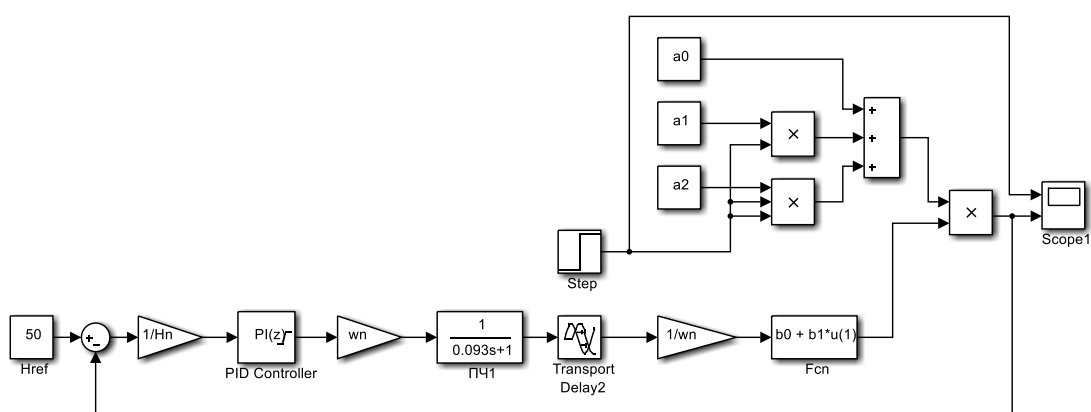
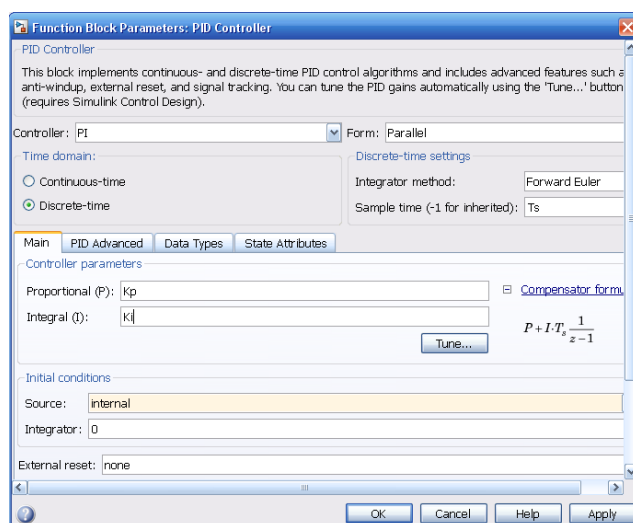
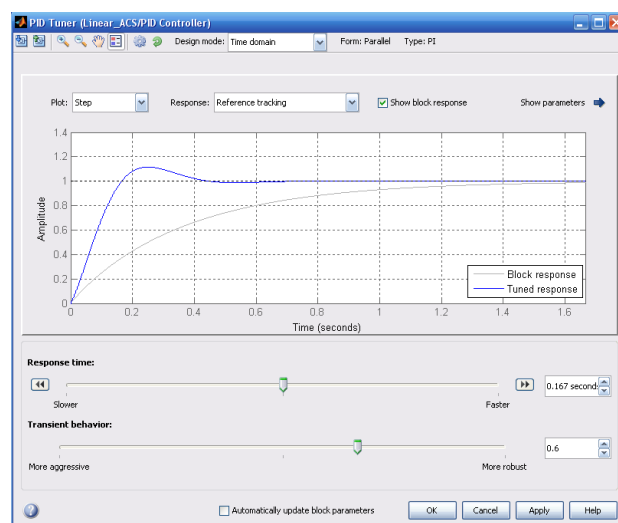


Рисунок 4.10 - Структурна схема Matlab/Simulink лінеаризованої моделі САК напором магістралі НУ

В блоці “PID Controller” реалізується алгоритм ПІ регулювання. Вікно налаштувань даного блоку зображено на рис. 4.11 а).



а)



б)

Рисунок 4.11 - Вікно налаштувань блоку “PID Controller” – а);
вікно інструменту «PID tuner» - б)

Для виконання автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІ-регулятора слід скористатися інструментом «PID tuner», натиснувши кнопку «Tune...» вікна налаштувань блоку “PID Controller”. Вигляд діалогового вікна інструменту «PID tuner» представлено на рис. 4.11 б).

Цей інструмент у середовищі Matlab/Simulink забезпечує зручний інтерфейс для налаштування бажаних характеристик перехідного процесу системи автоматичного керування.

Отримані значення коефіцієнтів ПІ регулятора становлять:

$$K_p = 0,1631; \quad K_i = 1,6151.$$

Таким чином, отримана узагальнена КІМ для випадку скалярного автоматичного керування рівнем напору магістралі НС на основі ЧР асинхронного електроприводу (рис. 4.12).

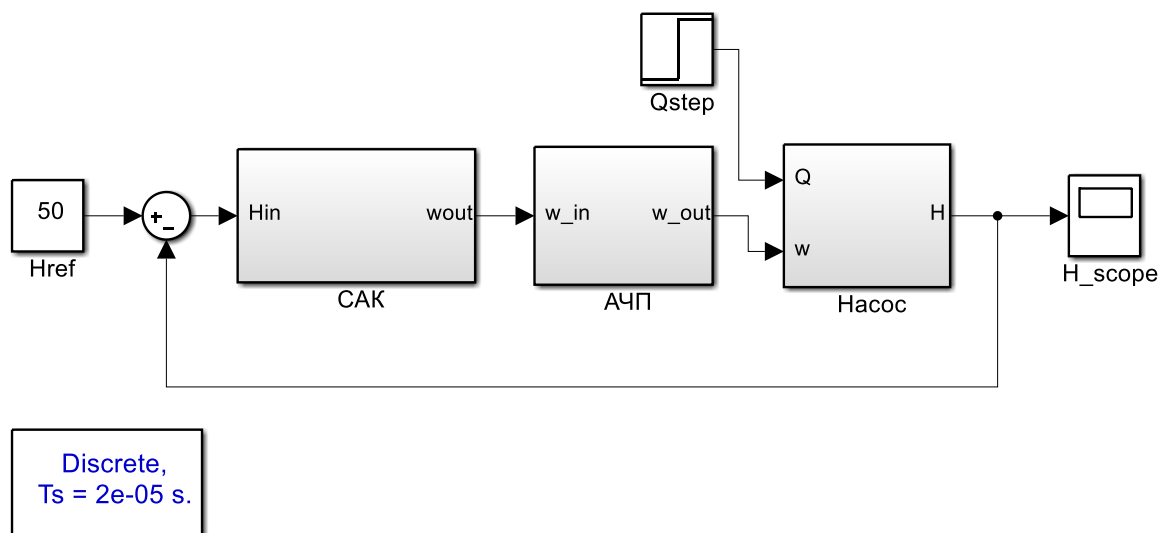


Рисунок 4.12 - Узагальнена КІМ для скалярного закону керування рівнем напорів в магістралі НС

Комп'ютерна імітаційна модель для випадку векторного керування відрізняється тільки блоком, що реалізує частотний електропривод.

4.4 Імітаційна модель паралельної роботи насосних агрегатів на мережу споживача

Розглянемо паралельну роботу насосів різних типів. У цьому випадку кожен насос впливатиме на роботу інших через тиск, який утворюється в магістральній мережі. Якщо насоси мають однакові характеристики, їхня продуктивність буде однаковою, а загальна продуктивність станції визначатиметься як добуток продуктивності одного насоса на кількість працюючих агрегатів. Коли насоси мають різні характеристики, визначення загальної продуктивності ускладнюється, оскільки в мережі встановлюється певний тиск, відповідно до якого кожен насос забезпечує свою подачу. У такому випадку загальна продуктивність є сумою продуктивностей окремих насосів при встановленому тиску.

Проаналізуємо ситуацію, коли паралельно працюють п'ять насосів: три з однаковою напірно-витратною характеристикою та два з іншою. Сумісна робота цих насосів описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} H = A_1 \cdot v_1^2 + B_1 \cdot v_1 \cdot Q_1 + C_1 \cdot Q_1^2; \\ H = A_2 \cdot v_2^2 + B_2 \cdot v_2 \cdot Q_2 + C_2 \cdot Q_2^2; \\ H = A_3 \cdot v_3^2 + B_3 \cdot v_3 \cdot Q_3 + C_3 \cdot Q_3^2; \\ H = A_4 \cdot v_4^2 + B_4 \cdot v_4 \cdot Q_4 + C_4 \cdot Q_4^2; \\ H = A_5 \cdot v_5^2 + B_5 \cdot v_5 \cdot Q_5 + C_5 \cdot Q_5^2. \end{cases} \quad (4.5)$$

де Q_i , v_i – значення продуктивності та відносної швидкості обертання робочого колеса i -го насоса, $i=1..5$; H – величина тиску, що розвивається у трубопроводі при паралельній роботі 5-ти насосів на мережу водопостачання.

Визначаємо продуктивності окремих насосів, розв'язавши систему (4.5):

$$\begin{cases} Q_1(H, v_1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-B_1 \cdot v_1 - \sqrt{B_1^2 \cdot v_1^2 + 4C_1 \cdot H - 4C_1 \cdot A_1 \cdot v_1^2}}{C_1} \right); \\ Q_2(H, v_2) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-B_2 \cdot v_2 - \sqrt{B_2^2 \cdot v_2^2 + 4C_2 \cdot H - 4C_2 \cdot A_2 \cdot v_2^2}}{C_2} \right); \\ Q_3(H, v_3) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-B_3 \cdot v_3 - \sqrt{B_3^2 \cdot v_3^2 + 4C_3 \cdot H - 4C_3 \cdot A_3 \cdot v_3^2}}{C_3} \right); \\ Q_4(H, v_4) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-B_4 \cdot v_4 - \sqrt{B_4^2 \cdot v_4^2 + 4C_4 \cdot H - 4C_4 \cdot A_4 \cdot v_4^2}}{C_4} \right); \\ Q_5(H, v_5) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-B_5 \cdot v_5 - \sqrt{B_5^2 \cdot v_5^2 + 4C_5 \cdot H - 4C_5 \cdot A_5 \cdot v_5^2}}{C_5} \right). \end{cases} \quad (4.6)$$

Таким чином, продуктивність кожного насосу визначатиметься тиском у трубопроводі. Комп'ютерну модель для випадку паралельної роботи 3-х насосів першого та 2-х насосів другого типів, що побудована на основі виразів (4.5)–(4.6) наведено на рис. 4.13.

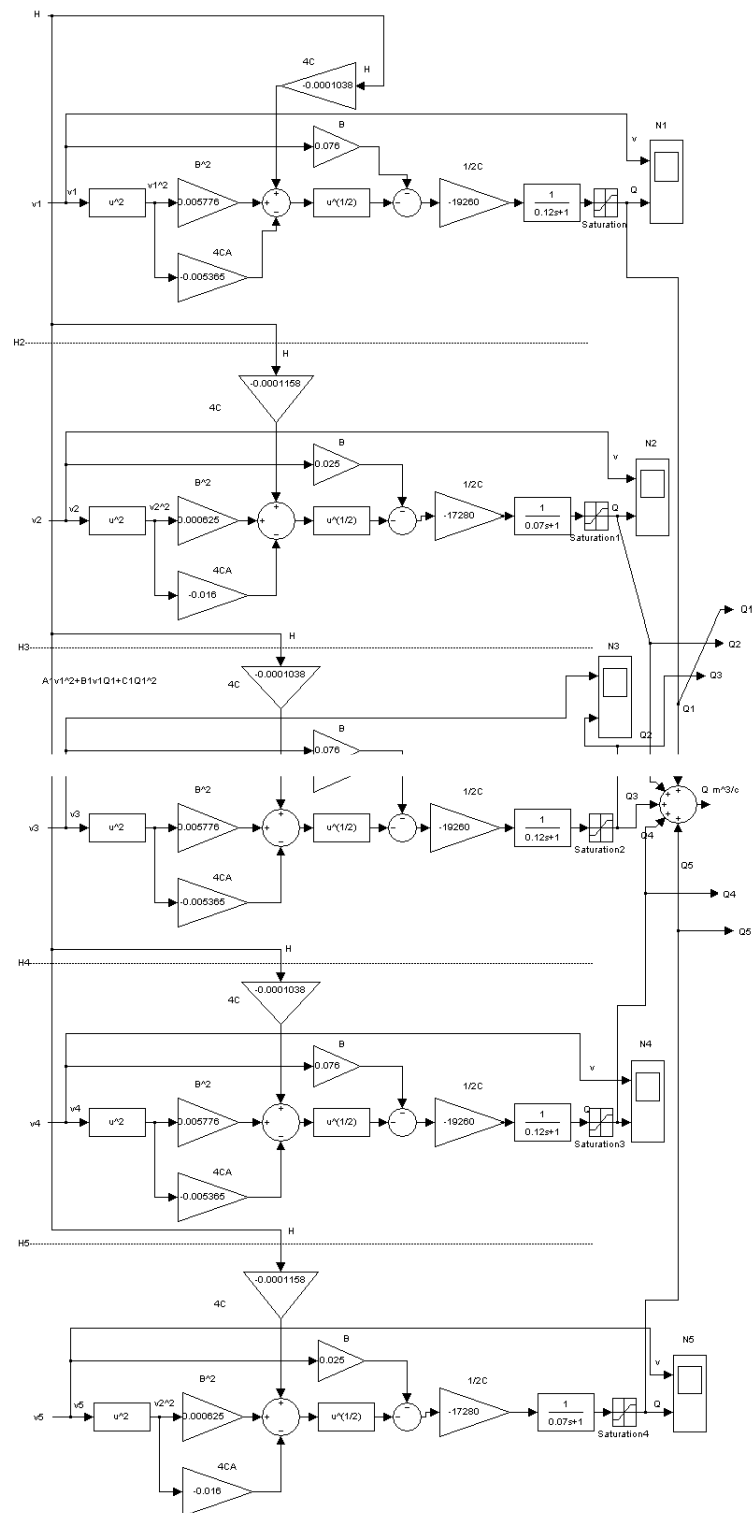


Рисунок 4.13 - Модель паралельної роботи п'яти насосів, середовище Simulink Matlab

При роботі групи п'яти насосів на мережу водопостачання, сумісну роботу НС в МВ запишемо системою рівнянь:

$$\begin{cases} H_M = H_C + R_M \cdot Q_M^2; \\ Q_M = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5; \\ H_M = H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = H_5; \\ H_1 = A_1 \cdot v_1^2 + B_1 \cdot v_1 \cdot Q_1 + C_1 \cdot Q_1^2; \\ H_2 = A_2 \cdot v_2^2 + B_2 \cdot v_2 \cdot Q_2 + C_2 \cdot Q_2^2; \\ H_3 = A_3 \cdot v_3^2 + B_3 \cdot v_3 \cdot Q_3 + C_3 \cdot Q_3^2; \\ H_4 = A_4 \cdot v_4^2 + B_4 \cdot v_4 \cdot Q_4 + C_4 \cdot Q_4^2; \\ H_5 = A_5 \cdot v_5^2 + B_5 \cdot v_5 \cdot Q_5 + C_5 \cdot Q_5^2. \end{cases} \quad (4.7)$$

Оскільки трубопровід є системою з розподіленими параметрами, між подачею певного об'єму рідини на його вхід і досягненням заданого тиску на виході проходить певний час. Це значення тиску формується із запізненням, яке визначається сталою часу відносно продуктивності, що подається насосною станцією в магістральну мережу.

Таким чином, ділянку магістральної мережі від насосної станції до диктуючої точки можна моделювати як аперіодичну ланку з певною сталою часу [12]. На вхід цієї ланки подається об'єм рідини, який генерує насосна станція, а на виході отримується об'єм рідини в диктуючій точці [12]:

$$W_{MB} = \frac{Q_{BHX}}{Q_{BX}} = \frac{1}{C_i \cdot p + 1}, \quad (4.8)$$

де $Q_{вх}$, $Q_{вих}$ – кількість рідини на вході та виході ділянки трубопроводу; C_i – постійна часу заповнення ділянки трубопроводу. Відповідно до [12] постійну часу заповнення ділянки трубопроводу круглого перерізу можна знайти з формули:

$$C_i = \frac{V_i}{Q_{i,ном}} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot L_i}{4Q_{i,ном}}, \quad (4.9)$$

де V_i – значення об'єму i -тої ділянки трубопроводу; $Q_{i,ном}$ – номінальне значення об'єму рідини, який може проходити по i -тій ділянці трубопроводу; D_i – величина діаметру трубопроводу; L_i – довжина трубопроводу.

Комп'ютерну модель такої мережі водопостачання представлено на рис. 4.14.

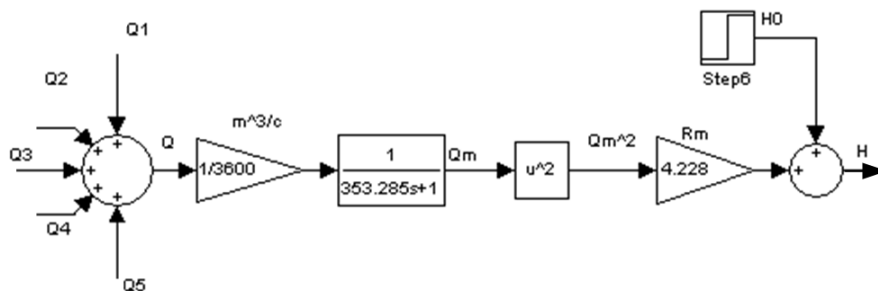


Рисунок 4.14 - Модель МВ, побудована в Matlab Simulink

Розглянуті імітаційні моделі дозволяють провести моделювання роботи НА з частотно-регульованим електроприводом та НС в цілому.

4.5 Моделювання режимів роботи скалярного та векторного ЧР електроприводу насосної установки

При скалярному законі керування, амплітуда напруги, що прикладається до обмотки статора асинхронного двигуна, змінюється пропорційно частоті. Такий закон пропорційного керування достатньо простий.

У главі 3 було обґрунтовано, що при роботі НУ потрібно підтримувати постійний напір у магістралі НС, не зважаючи на зміну продуктивності насосу.

На рис. 4.15 показано залежність зміни напору в магістралі від зміни продуктивності насосу. Магістраль працює з постійним напором $H = 50$ м. У момент часу $t_1=4,0$ с змінюється продуктивність насосу з $Q_{\min}$ до $Q_{\max}$, при цьому напір знижується до значення 44 м, а в момент часу $t_2=5,5$ с проходить відновлення напору до 50 м.

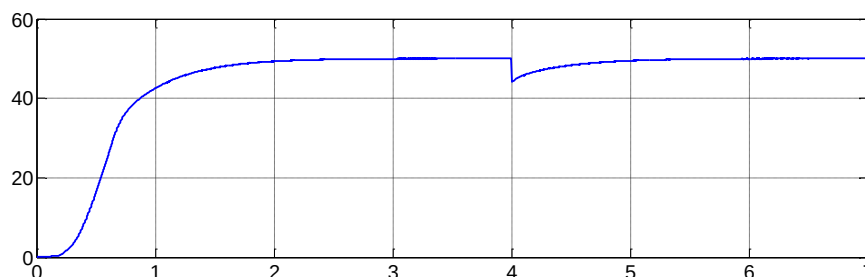


Рисунок 4.15 - Графік зміни напору H в магістралі НС

У результаті моделювання побудовані криві моменту (M) та швидкості в функції часу (рис.4.16 – 4.17) при пуску на холостому ході: $M_c=0$, накиду навантаження $M_c=M_n$ (в момент часу $t = 4$ с відбувається зміна витрати з $Q_{\min}$ до $Q_{\max}$).

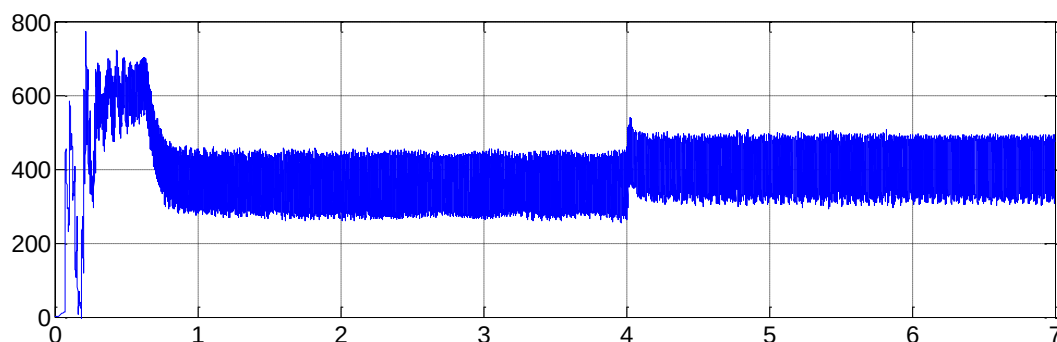


Рисунок 4.16 - Графік зміни електромагнітного моменту M_{em} у функції часу

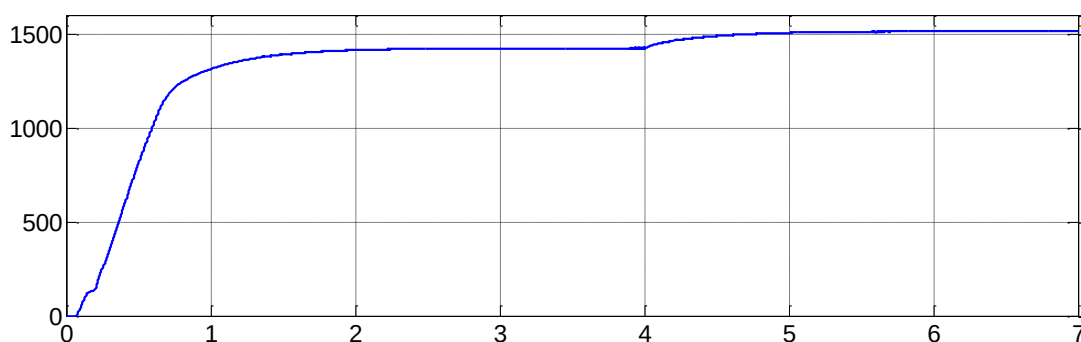


Рисунок 4.17 - Графік зміни частоти обертання валу відцентрового насоса

На рис. 4.18 – 4.19 наведено графіки зміни струму статора та ротора у функції часу, на рис. 4.20 – 4.21 – графіки зміни активної та реактивної потужності у часі.

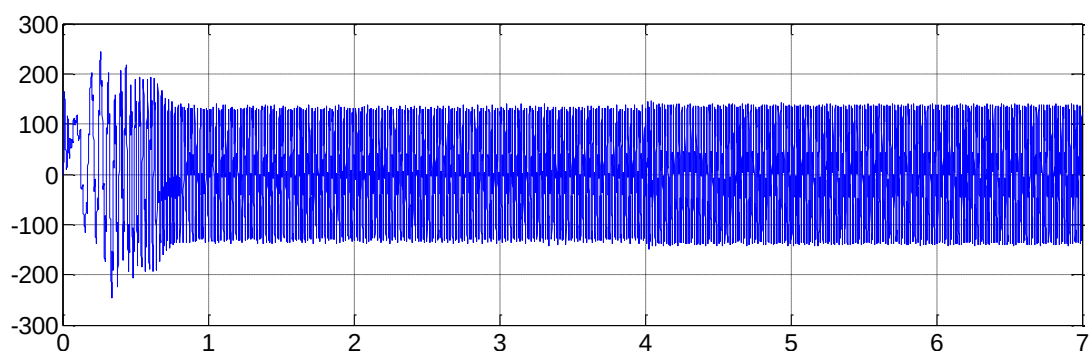


Рисунок 4.18 - Графік зміни струму обмотки статора у функції часу

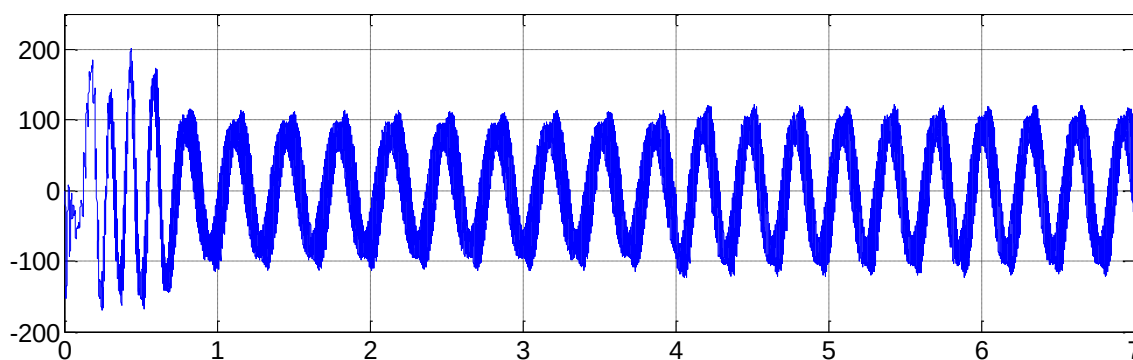


Рисунок 4.19 - Графік зміни струму ротора у функції часу

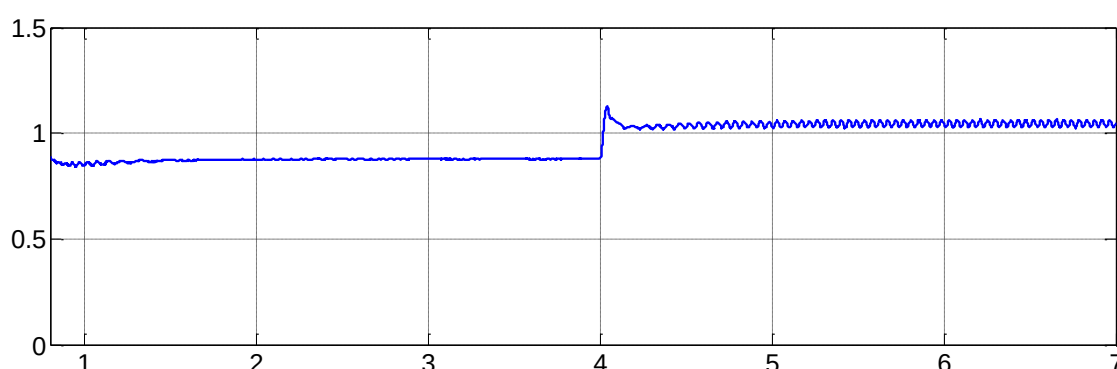


Рисунок 4.20 - Графік зміни активної потужності P в.о.

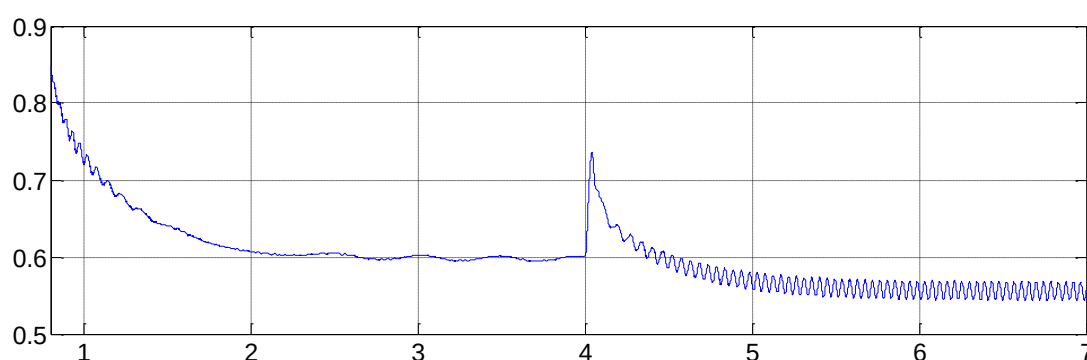


Рисунок 4.21 - Графік зміни реактивної потужності Q в.о.

Більш повно здійснити закладені в спосіб частотного керування АД можливості вдається тільки в замкнутих системах автоматичного керування, побудованих із залученням методів математичної теорії оптимального керування й методів синтезу багатозв'язкових систем підлеглого регулювання.

Для асинхронного електроприводу з векторною системою частотного керування були виконані аналогічні дослідження.

На рис. 4.22 показано, як змінюється напір при зміні продуктивності насосу.

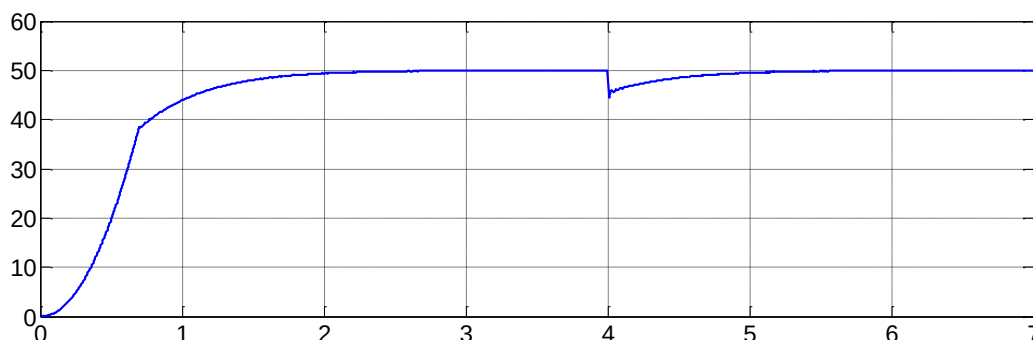


Рисунок 4.22 - Графік зміни напору H в магістралі насосної станції

На рис. 4.23 – 4.24 наведено криві моменту та швидкості в функції часу при пуску на холостому ході $M_c=0$, збільшенні навантаження $M_c=M_H$ (у момент часу $t = 4$ с спостерігається зміна витрати з $Q_{\min}$ до $Q_{\max}$).

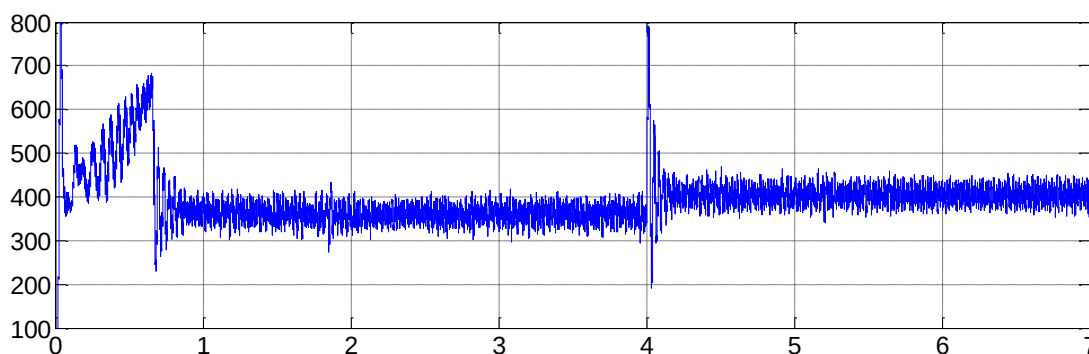


Рисунок 4.23 - Графік зміни електромагнітного моменту M_{em}

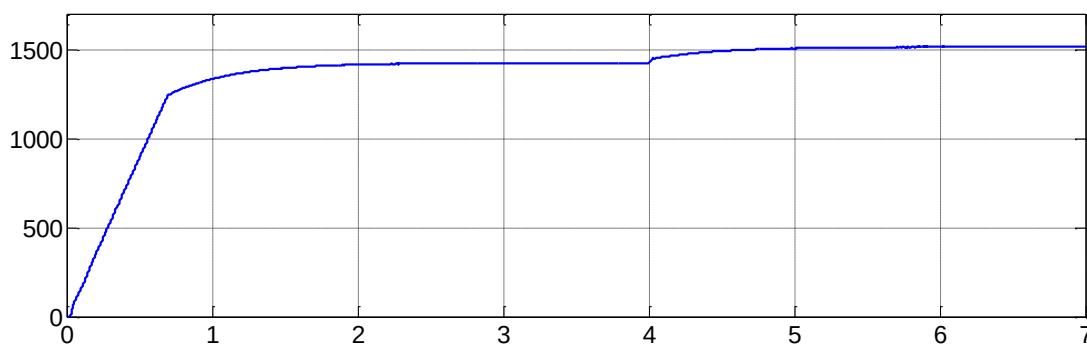


Рисунок 4.24 - Графік зміни частоти обертання валу ВН

На рис. 4.25 – 4.26 наведено графіки зміни струму статора та ротора у функції часу.

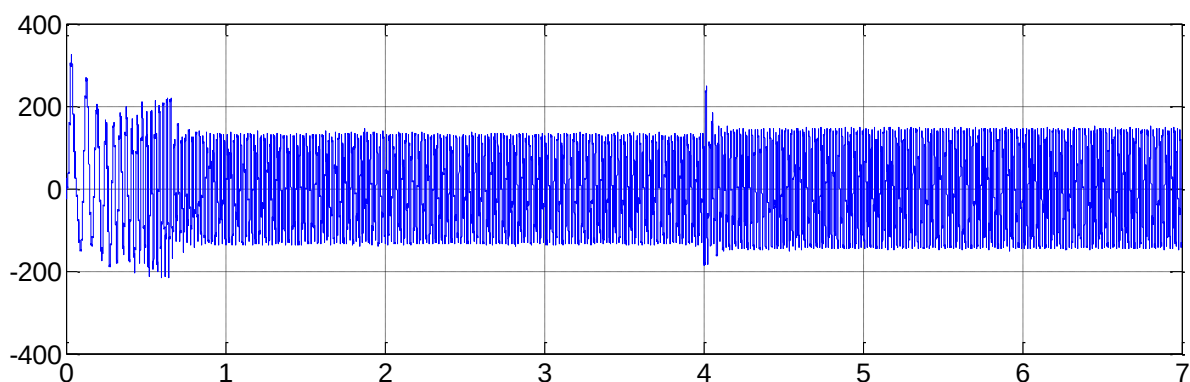


Рисунок 4.25 - Графік зміни струму статора у функції часу

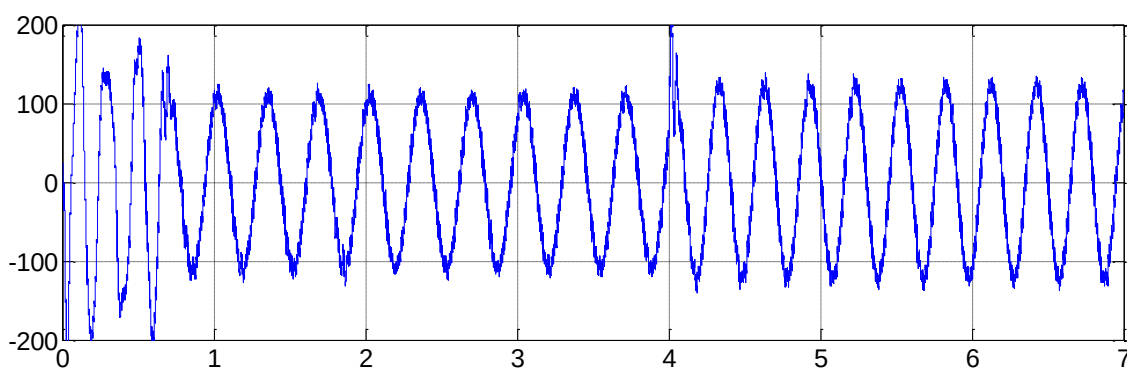


Рисунок 4.26 - Графік зміни струму ротора у функції часу

Графіки зміни активної та реактивної потужності у часі наведено на рис. 4.27-4.28.

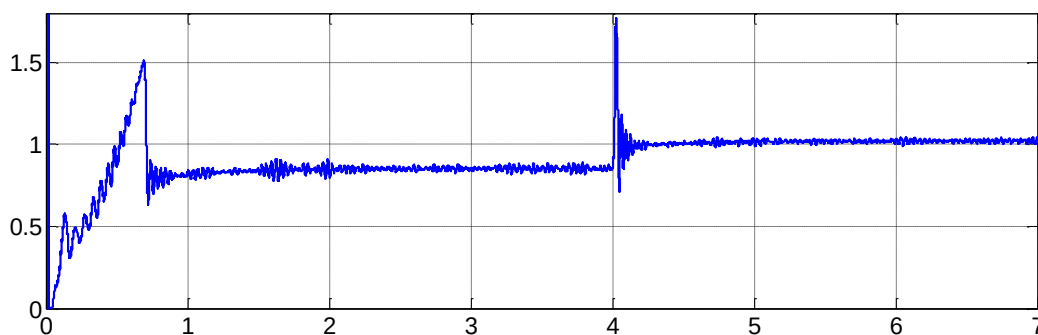


Рисунок 4.27 - Графік зміни активної потужності P в.о.

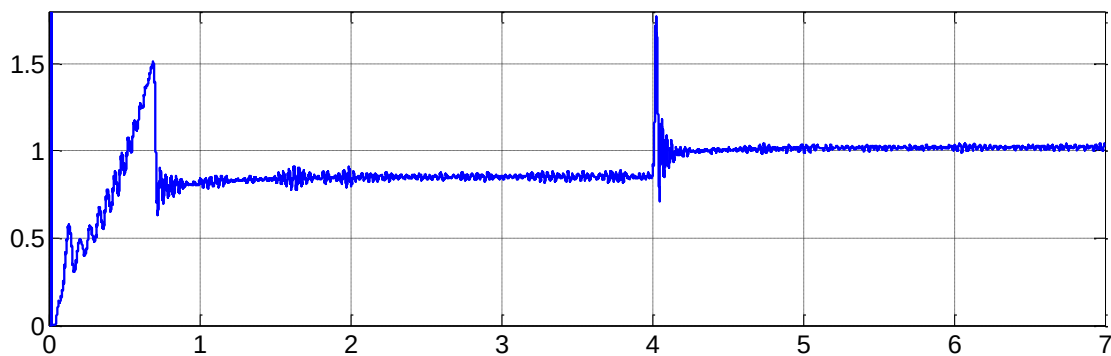


Рисунок 4.28 - Графік зміни реактивної потужності Q в.о.

Отже, скалярний закон керування є ефективним при незначних відхиленнях частоти обертання. Для електроприводів, які працюють при низьких частотах, а також для тих, що мають глибоке регулювання швидкості, використовують векторний закон керування або коригують пропорційний закон керування. Це дозволяє збільшити відношення U_1/f_1 при зниженні частоти, що забезпечує часткову або повну компенсацію падіння напруги на активних опорах обмотки статора.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОТЕХІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

Вимоги щодо охорони праці при експлуатації та виконанні ремонтних робіт на насосних станціях викладені в Правилах безпечної експлуатації насосних станцій водогосподарських систем [30].

Ці Правила поширюються на всіх суб'єктів господарювання незалежно від їх форм власності, які організовують або виконують роботи з технічної експлуатації насосних станцій на водогосподарських системах і спорудах, та на працівників, що виконують роботи з технічної експлуатації, налагоджування, обслуговування, ремонту та випробування електротехнічних установок та обладнання насосних станцій.

До загальних вимог можна віднести наступні положення:

- роботодавець зобов'язаний, відповідно до чинних нормативно-правових актів, створити в кожному структурному підрозділі належні умови праці та забезпечити дотримання законодавчих вимог щодо охорони прав працівників;
- на підприємствах, які експлуатують насосні станції, розробляються інструкції з охорони праці відповідно до вимог Положення про розробку інструкцій з охорони праці [31];
- працівники, які займаються технічною експлуатацією та обслуговуванням насосних станцій, забезпечуються спеціальним одягом, взуттям та іншими засобами індивідуального захисту відповідно до норми безкоштовного надання таких засобів для працівників водного господарства;
- під час виконання робіт, не пов'язаних із експлуатацією електротехнічного обладнання або гідромеханічного обладнання насосних станцій, необхідно виконувати правила, норми, інструкції та інші чинні нормативно-правові акти з охорони праці;

- території відкритих розподільчих устаткувань (далі - ВРУ) і трансформаторних підстанцій повинні бути огорожені зовнішньою сітчастою огорожею заввишки 1,8 - 2 м;
- на входних хвіртках огорожень ВРУ та трансформаторних підстанцій повинен бути прикріплений такий попереджувальний знак: "ОБЕРЕЖНО! ЕЛЕКТРИЧНА НАПРУГА";
- під час експлуатації виробничого устаткування повинні виконуватися вимоги, викладені в документації з експлуатації електротехнічних установок, гідротехнічного та гідромеханічного обладнання насосних станцій.

5.1 Основні небезпечні та шкідливі виробничі чинники під час експлуатації насосних станцій

Під час виконання робіт на насосних станціях працівники можуть зазнати впливу таких основних небезпечних та шкідливих виробничих факторів як фізичні та психофізіологічні. До основних фізичних факторів відносяться рухомі машини та механізми, частини виробничого обладнання; зміна значень температури поверхні обладнання, трубопроводів, зміна значень температури та вологості повітря робочої зони; підвищені рівні шуму та вібрації на робочих місцях; підвищене значення напруги електричного кола, замикання якого може статися через тіло людини; недостатність природного та штучного освітлення робочої зони. До основних психофізіологічних факторів відносяться перевантаження: динамічні, статичні та нервово-психічні.

При виконання технологічних операцій передбачено: забезпечення захисту працівників від впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів за допомогою колективних і індивідуальних засобів захисту; оперативне отримання даних про прояв небезпечних і шкідливих факторів під час виконання окремих виробничих завдань; впровадження системи моніторингу та управління

технологічним процесом, яка гарантує безпеку працівників та аварійне відключення виробничого обладнання.

На насосних станціях роботи здійснюються на підставі наряду-допуску, розпорядження або в порядку поточної експлуатації. Список робіт, що забезпечуються в порядку поточної експлуатації, затверджується керівником підприємства або власником НС. Роботи, які не включені до цього списку і не виконуються за розпорядженням, повинні виконуватися за нарядом-допуском.

Ремонт обладнання дозволяється виконувати лише за умови виконання заходів безпеки, що виключають можливість його запуску в роботу (вмикання двигуна, подача води тощо). Забороняється знімати захисні кожухи або торкатися струмоведучих елементів електрообладнання (контактів реле, автоматичних пристроїв, кабельних з'єднань двигунів, механізмів запорів і засувки тощо), у разі коли вони перебувають під напругою.

При обслуговуванні обладнання в зонах без стаціонарного освітлення потрібно використовувати акумуляторні світильники, або переносні ручні світильники, що забезпечують достатній рівень освітленості.

5.2 Основні вимоги до безпеки при обслуговуванні електроустановок насосних станцій

Висуваються вимоги до працівників, які здійснюють обслуговування електроустановок НС. Ці вимоги полягають у знанні оперативних схем, особливостей обладнання, інструкцій з ОП, експлуатаційних та посадових інструкцій. Обов'язковим є проходження перевірки знань на підприємстві та навчання. Одноосібне обслуговування електроустановок можливе в тому випадку, якщо ця особа входить до списку, який складено відповідальним за електрогосподарство НС та підписано власником або керівником НС. Вимоги до

групи з електробезпеки: III - в електроустановках напругою до 1 кВ, IV - понад 1 кВ.

Під час огляду електричного обладнання потрібно дотримуватися встановлених правил безпеки та забороняється: прибирати огороження або бар'єри, попереджувальні плакати; торкатися, обтирати, чистити струмовідні частини; усувати знайдені несправності; заходити до шаф закритих розподільчих пристроїв, якщо напруга перевищує 1 кВ.

Двері приміщень, де розташовані електроустановки (щити, збірки тощо), мають бути завжди зачинені на замок. Для кожного такого приміщення необхідно мати щонайменше два комплекти ключів, один із яких є резервним. Усі ключі мають бути пронумеровані та зберігатися у чергового працівника. Під час своїх змін він надає їх під розписку лише тим особам, які мають дозвіл на огляд електроустановок або виконання робіт на них відповідно до порядку-допуску чи розпорядження.

У чергових працівників, відповідальних за обслуговування електроустановок, обов'язково повинні бути розміщені інструкції з надання першої допомоги при ураженні електричним струмом та інших нещасних випадках.

Роботодавець, який експлуатує насосну станцію, повинен забезпечити безпечні умови праці на кожному робочому місці, а також гарантувати безпечне функціонування технологічних процесів, електротехнічного обладнання, гідротехнічних і гідромеханічних пристроїв та інших засобів виробництва. Він зобов'язаний надати працівникам засоби індивідуального та колективного захисту.

Крім того, роботодавець зобов'язаний створити на робочих місцях насосної станції безпечні та належні санітарно-гігієнічні умови праці відповідно до вимог чинних санітарних норм і правил.

На насосних станціях у приміщеннях чергового персоналу мають бути аптечки з актуальним набором медикаментів та інструкції щодо їх використання.

Місце зберігання аптечки вибирає відповідальна особа. У виробничих приміщеннях необхідно розмістити правила та плакати з надання першої допомоги.

Працівників слід забезпечити спецодягом, спецвзуттям та засобами індивідуального захисту відповідно до норм. Для роботи з електроустановками обов'язково гумові діелектричні килимки та ізолювальні підставки. Перед використанням захисних засобів їх перевіряють на справність та термін придатності.

Засоби захисту повинні зберігатися у визначених місцях, обладнаних шафами або стелажми, з відповідними переліками засобів. Вони мають регулярно оглядатися і випробовуватися, а несправні вилучатися.

Будівлі та споруди насосної станції слід обладнати первинними засобами пожежогасіння, а працівників навчити їх використовувати. Заборонено експлуатацію обладнання без справних пристроїв, що забезпечують дотримання санітарних норм.

5.3 Створення безпечних умов виконання робіт на НС за рахунок організаційних та технічних заходів

Насамперед, до організаційних заходів, що забезпечують безпечне виконання робіт в устаткуванні НС слід віднести: призначення відповідальних осіб та встановлення переліку робіт, що потрібно виконувати за розпорядженнями, нарядами-допусками та в порядку поточної експлуатації. Далі складається заявка на виведення обладнання в ремонт, оформлюється розпорядження або наряд-допуск, видається виконавцю чи керівнику робіт. Потім виконується підготовка робочого місця, допуск до роботи та спостереження за ходом виконання робіт, завершення роботи. Можливе переведення на друге робоче місце, оформлення перерв у виконанні роботи.

Ремонт і обслуговування електротехнічного, гідротехнічного та гідромеханічного обладнання насосної станції можуть виконуватися за нарядом-допуском, розпорядженням або без нього. У разі ліквідації аварії або аварійної ситуації дозволяється проводити роботи без наряду-допуску, але з подальшим його оформленням.

Списки працівників, уповноважених видавати наряди-допуски і розпорядження, а також керівників робіт, допускачів і переліки робіт, що забезпечуються за нарядами-допусками, розпорядженнями або в режимі поточної експлуатації, робить відповідальний за електрогосподарство і затверджує керівник підприємства або власник насосної станції. Ці списки та переліки переглядаються і затверджуються щорічно.

За безпечне виконання робіт в електроустановках НС, на гідротехнічному обладнанні відповідають: працівник, який видає наряд-допуск чи розпорядження; дозвіл на підготовку робочого місця, який допускає до роботи; який готує допуск до роботи та робоче місце, керівник робіт, наглядач, члени бригади та виконавці робіт.

Право видавати наряди-допуски та розпорядження надається адміністративно-технічним працівникам підприємства, що експлуатують одну або декілька насосних станцій, за умови, що вони мають групу V з електробезпеки для електроустановок понад 1000 В та групу IV для установок до 1000 В.

Керівник робіт несе відповідальність за:

- вжиття та достатність заходів безпеки, визначених нарядом-допуском або розпорядженням;
- чітке та повне проведення інструктажу для членів бригади та виконавців робіт з числа оперативного персоналу (машиністів насосних установок);
- наявність, справність і правильне використання засобів захисту, інструментів, інвентарю та пристосувань;

- збереження та забезпечення постійної присутності на робочому місці заземлень, огорожень, знаків і плакатів безпеки, запірних пристроїв у течії зміни;
- організацію робіт, їх безпечне виконання та дотримання встановлених Правил [30].

Після завершення ремонтних робіт необхідно привести до ладу робоче місце. Для цього виконуються такі дії: виведення бригади, зняття тимчасових огорожень і плакатів, зняття заземлення, відновлення стаціонарних огорожень та плакатів.

За потреби перед увімкненням відремонтованого електроустаткування проводиться перевірка ізоляції, яку слід виконати після зняття переносних заземлень, але до прибирання тимчасових огорожень і застережних плакатів. Устаткування може бути увімкнене тільки після закриття наряду-допуску.

Якщо роботи виконувалися за кількома нарядами-допусками на одній відключеній ділянці, увімкнення устаткування дозволяється лише після закриття всіх нарядів-допусків.

Категорично забороняється підготовка до вмикання або випробування під напругу будь-якого устаткування до повного завершення робіт за нарядом-допуском.

Наряд-допуск можна закрити лише після огляду устаткування та робочих місць, а також перевірки на відсутність людей, сторонніх предметів та інструментів. Закриття наряду-допуску проводиться керівником робіт шляхом внесення відповідного запису до наряду-допуску та журналу обліку робіт за нарядом-допуском або розпорядженням.

До технічних заходів, що потрібно виконувати для створення безпечних умов робіт в електроустановках НС, що виконуються із відключенням напруги, відноситься: підготовка до роботи робочих місць, зняття (вимикання) напруги, розміщення плакатів безпеки, огороження всіх робочих місць, перевірки відсутності напруги.

Заземлення струмовідних частин електрообладнання НС виконується для того, щоб захистити працівників від ураження електричним струмом, якщо трапиться помилкова подача напруги до місця роботи.

Пристрої для заземлення електроустановок мають відповідати вимогам для забезпечення захисту працівників від уражень електричним струмом, захисту електроустановок і підтримання належних експлуатаційних режимів їх роботи. Металеві частини електрообладнання та електроустановок, на яких через пошкодження ізоляції може з'явитися напруга, підлягають заземленню або зануленню. Кожен заземлювальний пристрій, що перебуває в експлуатації, повинен мати паспорт.

5.4 Заходи щодо запобігання аварій та ліквідації їх наслідків на НС

На підприємстві має бути розроблений план дій для локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій відповідно до встановлених вимог [32]. Працівники насосної станції під час аварій або аварійних ситуацій повинні діяти згідно з цим планом.

У випадку аварійної ситуації на насосній станції необхідно: зупинити роботу; вжити заходів для запобігання загрозі життю та здоров'ю людей; покинути небезпечну зону та повідомити про подію керівництво і, за потреби, відповідні служби; не допускати сторонніх осіб у небезпечну зону; за можливості, вжити заходи для усунення аварійної ситуації.

У разі відсутності адміністративно-технічних працівників, уповноважених на видачу нарядів-допусків або розпоряджень, право видачі наряд-допуску чи розпорядження для робіт, спрямованих на запобігання аварії або ліквідацію її наслідків, передається оперативному працівнику (машиністу насосних установок) із групою IV з електробезпеки.

Оперативні працівники можуть брати участь у ліквідації аварій та їх наслідків (безпосередньо або шляхом нагляду за іншими працівниками під час виконання робіт без наряду-допуску) з дозволу старшого оперативного працівника зміни або адміністративно-технічного працівника, відповідного за використання насосної станції. Якщо зв'язок зі старшим у зміні відсутній, такий дозвіл не вимагається.

Під час виконання аварійних робіт в електроустановках НС черговими працівниками або ремонтними бригадами необхідно оформити наряди-допуски та забезпечити допуск до робіт відповідно до вимог.

Якщо на момент виникнення аварійної ситуації на НС відсутні працівники, уповноважені видавати наряд-допуск, для прискорення ліквідації аварії це може виконати черговий або оперативно-ремонтний працівник підприємства з IV групою допуску з електробезпеки, що отримав вказівку особи, відповідальної за електрогосподарство.

Усі працівники, задіяні в експлуатації насосної станції, мають бути навченими практичним діям для вивільнення постраждалого від впливу електричного струму, надання долікарської допомоги при пошкодженнях електрострумом та інших нещасних випадках.

У разі нещасного випадку, коли людина вражена електричним струмом, зняття напруги для звільнення постраждалого має бути здійснене одразу, без необхідності отримання попереднього дозволу. Під час виконання робіт обов'язково слід дотримуватися всіх організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці.

Розслідування та облік аварій, нещасних випадків, які сталися під час експлуатації електротехнічного, гідромеханічного чи гідротехнічного обладнання НС, а також професійних захворювань проводяться відповідно до затвердженого порядку [33].

5.5 Стійкість роботи системи управління НС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Стійкістю роботи системи управління насосною станцією вважають її спроможність працювати безвідмовно в умовах надзвичайної ситуації, а при отриманні певних пошкоджень чи порушення роботи, відновлювати роботу у мінімальні терміни.

Проаналізуємо стійкість роботи системи керування НС в умовах впливу іонізуючих випромінювань. Регульований електропривод насосної установки має у своєму складі перетворювач частоти, елементи якого (інвертор, випрямляч, фільтри, блок живлення, блок цифрового управління) являються чутливими до дії іонізуючого випромінювання. Під дією випромінювання погіршуються характеристики матеріалів, можуть змінитися електричні властивості ізоляторів і напівпровідників, знизитися ефективність транзисторів і схем. В конденсаторі може знизитися напруга пробою та опір витоку, змінюється провідність та внутрішнє нагрівання. В інверторі іонізуюче випромінювання впливає на коефіцієнт підсилення та зворотній струм. Незворотні зміни в елементній базі виникають при граничних дозах опромінення ($D_{\text{грі}}$), значення яких наведено в таблиці 5.1[34].

Таблиця 5.1- Граничні дози опромінювання для елементів електроприводів НС

№	Структурні блоки	Елементи блоків	$D_{\text{грі}}, \text{Р}$
1	Випрямляч	Діоди	10^4
2	Інвертор напруги	Транзистори, діоди	10^4
		Напівпровідники	10^5
		Конденсатори	10^7
3	Блок живлення	Мікросхеми, напівпровідники	10^5
		Інтегральні схеми	$5 \cdot 10^5$
		Конденсатори, Резистори	10^7

Аналіз таблиці 5.1 показує, що мінімальну граничну дозу опромінювання мають транзистори та діоди, елементи блоку живлення.

Знаходимо можливу дозу опромінення за формулою:

$$D_m = \frac{2 \cdot P_1 \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{\text{посл.}}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot (\sqrt{43800} - \sqrt{1})}{1} = 2082 \text{ Р},$$

де $P_1 = 5,05$ - значення максимального рівня радіації, Р/год;

$t_n = 1$ - значення часу початку опромінення, год;

$t_k = 131400$ - час кінця опромінення, год;

$K_{\text{посл.}}$ - величина коефіцієнту послаблення радіації.

Таким чином $D_{\text{грі}} > D_m$, та можливо зробити висновок про стійкість електроприводів до дії радіації.

Визначимо допустимий час роботи в заданих умовах:

$$t_{\text{дон}} = \frac{D_{\text{зр}} \cdot K_{\text{посл.}} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2P_1} = \frac{10000 \cdot 1 + 2 \cdot 5 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 5} = 1001 \text{ год.}$$

Отже, на основі проведених розрахунків можна зробити висновок, що електропривод може безпечно працювати під дією іонізуючих випромінювань. Допустимий час роботи в прийнятих умовах дорівнює 1001 год., якщо рівень радіації - 5 Р/год.

Проаналізуємо стійкість роботи системи керування НС в умовах дії електромагнітного імпульсу (ЕМІ).

Горизонтальна складова напруженості електромагнітного поля:

$$E_r = 10,0 \text{ кВ/м.}$$

Горизонтальна та вертикальна напруга наводки:

$$U_{zi} = E_{zi} \cdot l_{zi} = 10,0 \cdot 10^3 \cdot 3,5 = 35000 \text{ В};$$

$$U_{ei} = E_{zi} \cdot l_e = 10,0 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 500 \text{ В.}$$

Розраховуємо допустимі значення коливання напруги для блоку живлення 12 В:

$$U_{\partial} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot n = 12 + \frac{12}{100} \cdot 15 = 13,8 \text{ В},$$

де n - відсоток коливання напруги.

Коефіцієнт безпеки: $K_{б.з.} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\partial}}{U_{з(в)}} \geq 40 \text{ дБ.}$

Наприклад, коефіцієнт безпеки горизонтальний для блоку живлення:

$$K_{б.з.} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\partial}}{U_{з}} = 20 \cdot \lg \frac{13,8}{35000} = -68,86 \text{ дБ;}$$

Для інших блоків розрахунки проводяться аналогічно та зведено до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2- Розрахункові значення коефіцієнтів безпеки блоків

№	Найменування	Напруга U_{∂} , В	Коефіцієнт безпеки $K_{б}$, дБ		t , см
			$K_{бг}$	$K_{бв}$	
1	Блок керування 24В	27,6	-68,08	-31,18	0,17
2	Блок живлення 12 В	13,8	-62,06	-25,16	0,16
3	Силові елементи 300 В	345	-40,12	-3,22	0,13

Таким чином, система керування НС нестійка під дією впливу електромагнітного імпульсу. З метою підвищення стійкості роботи запропоновано виконувати екранування напівпровідникових та горизонтальних струмопровідних елементів.

Розрахуємо екранування блоку живлення сталевим екраном:

$$A = 40 + K_{б\min} = 40 + 62,06 = 102,06 \text{ дБ;}$$

Розрахуємо товщину захисного екрану:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}} = \frac{102,6}{5,2 \cdot \sqrt{15 \cdot 10^3}} = 0,16 \text{ см,}$$

де f - найбільш характерна частота $15 \cdot 10^3$ Гц.

Отже, екранування основних елементів системи дозволяє досягти її стійкої роботи в умовах дії електромагнітного імпульсу. Також підвищенню стійкості системи в умовах дії ЕМІ сприяє екранування кабелів живлення, зменшення довжини струмопровідних провідників за рахунок вдосконалення схем компоновки блоків управління системою керування насосною станцією.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі проведено дослідження ефективності режимів роботи насосних установок при зміні продуктивності. Проаналізовані способи регулювання продуктивності насосних установок, доведено, що найбільш ефективним є регулювання за рахунок зміни частоти обертання робочих коліс насосів, яке може бути отримане за рахунок зміни частоти обертання електродвигуна. Можливе поєднання різних способів регулювання.

Розглянуто приклад паралельної роботи насосних агрегатів з точки зору споживання електроенергії та регулювання подачі при зміні водоспоживання. Показано, що регулювання продуктивності у «великому» відбувається зміною кількості працюючих насосів, а у «малому» – зміною частоти обертання одного НА. Для регульованих НА, які працюють в групі паралельно і мають різні характеристики, критерієм правильного розподілу навантаження між ними є мінімум сумарних енергозатрат.

Для досліджуваної НС продуктивністю $Q_{\text{ном}} = 320 \text{ м}^3/\text{год}$ з паралельно працюючими насосними агрегатами, проаналізовані схеми з одним або декількома перетворювачами на групу насосів. Показано, що кількісне співвідношення паралельно працюючих регульованих та нерегульованих електроприводів суттєво впливає на роботу системи.

Так при встановленні регульованого електроприводу на один працюючий насос та значній зміні продуктивності насосної станції він може вийти за межі свого оптимального діапазону регулювання. При сумісній паралельній роботі одного регульованого насосу з групою нерегульованих насосів, збільшення кількості нерегульованих насосів приводить до зменшення зони частоти регулювання. Побудовані напірні характеристики НУ для окремо працюючого регульованого електропривода насоса потужністю $P_{\text{ном}} = 75 \text{ кВт}$ та сумісної роботи паралельно підключених насосних агрегатів з двигунами потужністю $P_{\text{ном}} = 37 \text{ кВт}$, кожний. Визначено діапазон регулювання частоти обертання регульованого електропривода.

Кращі показники гнучкості та надійності роботи системи, плавність регулювання продуктивності у ширшому діапазоні навантажень має конфігурація

підключення насосів, що складається з декількох регульованих та нерегульованих електроприводів. В роботі розглянуто використання двох регульованих та двох нерегульованих електроприводів насосів потужністю $P_{\text{ном}} = 22$ кВт, кожний.

Проведено техніко-економічне порівняння запропонованих варіантів конфігурацій насосної станції. За результатами розрахунків обрано варіант встановлення 4-х насосів з двома регульованими електроприводами.

Конфігурація з двома регульованими та двома нерегульованими насосами є ефективною для систем, де потрібна висока гнучкість і стабільність при значних перепадах навантаження. Вона дозволяє забезпечити баланс між енергоефективністю та надійністю, хоча й вимагає грамотного підходу до автоматизації та додаткових інвестицій в управління та обслуговування.

За допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання проведений аналіз роботи насосної станції на основі частотно-регульованого асинхронного електропривода при скалярному та векторному законах частотного регулювання.

Використання скалярного закону керування ефективно при незначних відхиленнях частоти обертання. Для електроприводів в області низьких частот, а також для електроприводів з глибоким регулюванням швидкості потрібно застосовувати векторний закон керування або коректувати закон пропорційного керування, забезпечуючи збільшення відношення U_1/f_1 при зниженні частоти.

Розібравши основні варіанти підключення насосів, можливо зробити загальний висновок, який свідчить, що вибір оптимальної кількості насосів з регульованим/нерегульованим приводом залежить від аналізу потреб мережі, характеристик обладнання та бюджету.

Для досліджуваної НС сформована енергоефективна структура, що має у своєму складі дві групи насосних агрегатів з двома перетворювачами частоти. Запропонована структура НС дозволяє зберігати високий рівень експлуатаційних характеристик електродвигунів, максимально знизити енергозатрати та підвищити надійність функції частотного регулювання.

Результати роботи можливо використовувати як для модернізації існуючих насосних станцій, так і для проектування нових енергоефективних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Оцінка стану водопровідно-каналізаційного господарства України Сухорукова Т.Г., Клочко Ю.С./ Вісник економіки транспорту і промисловості № 63, 2018, с.53-59
2. Срібнюк С.М. Насоси і насосні установки . – Центр учбової літератури, 2019. 312 с.
3. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О.І.Соловей, В.П. Розен, П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, В.Ф.Ткаченко, К.Г. Петрова]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац.техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
4. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К: Кондор, 2005. – 408 с.
5. Ефективність впровадження заходів по економії енергоресурсів на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства С. М. Срібнюк, М. В. Григоренко/ Економіка та держава № 9, 2008 с.79-81
6. Сотник М. І. Аналіз способів регулювання роботи насосних станцій комунального водопостачання / М. І. Сотник, С. О. Хованський, О. І. Дужак // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2008. – №2. – С. 152–157
7. Алгоритм роботи системи керування групою паралельно працюючих насосів станції водопостачання/ М. М. Мошноріз // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. - №3. - С. 58-60
8. Автоматизована система водопостачання, яка складається з двох насосних агрегатів / М. М. Мошноріз // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Механіко-технологічні системи та комплекси. - 2017. - № 19. - С. 80-85.
9. Коренькова Т.В. Режимы работы насосных та вентиляторных установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник / Т.В. Коренькова, О.О.

Сердюк, В.Г. Ковальчук. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2014. – 200 с.

10. Грабко В. В. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.

11. Орлов В.О. Водопостачання промислових підприємств.: Навч. пос./ В.О. Орлов, Л.Л. Литвиненко, А.М. Орлова. – Знання, 2014. – 278 с.

12. Шадура В.О., Кравченко Н.В. Водопостачання та водовідведення : навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2018. 243 с.

13. Хом'юк І. В. Математичне програмування. Ч. 1 : навч. пос. / І. В. Хом'юк, В. Л. Карпенко, В. В. Хом'юк. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 78 с.

14. Правила улаштування електроустановок., видання третє, перероблене і доповнене. Мінпаливенерго 2010 р.-736 с.

15. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Державний нормативний акт про охорону праці. Київ, 1998р.

16. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл

17. Шевченко І.С., Морозов Д.І. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка асинхронного електропривода: навч. посібник / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – Київ: Кафедра, 2014. – 328 с.

18. М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладирь, В. Г. Ковальчук Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навчальний посібник. Харків: Видавництво «Точка», 2017. 206 с.

19. Головний каталог насосів DAB. [Електронний ресурс].– Режим доступу: www.promnasos.com.ua/ua/nkm-gnkp-g.html.

20. Електричний двигун серії ІЕЗ. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <http://uk.zhuhongmotor.com/>

21. Безпека праці та промислова санітарія. Навчальний посібник до курсу «Охорони праці»:[К.Н. Ткачук та ін.]– Тернопіль.: 2018. – 213с.

22. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Електронний ресурс].–Режим доступу: https://dnaop.com/html/29590_20.html
23. Лідньов А.О. Інструкція з охорони праці для електромонтера з ремонту і обслуговування електроустаткування. –Київ.:2018– 13 ст.
24. Моделювання електромеханічних систем: Підручник/Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.
25. Ловейкін В.С. Частотне керування асинхронним приводом / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – Ніжин.: Міланік, 2011. – 98 с.
26. Надвисокоєфективний двигун серії KE3 [Електронний ресурс].–Режим доступу: https://www.kg-electric.com/ELECTRIC_MOTORS.html
27. Energy-Efficient Electric Motors, Revised and Expanded. Ali Emadi., 2018
28. ATV600_catalog_2021_en PDF. [Електронний ресурс].– Режим доступу: www.electrocentr.com.ua
29. Верба В.А, Загородніх О.А. Проектний аналіз: Підручник. Київ: КНЕУ, 2000. -332с.
30. НПАОП 01.41-1.11-10 Правила безпечної експлуатації насосних станцій водогосподарських систем. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=28594
31. Положення про розробку інструкцій з охорони праці. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-98#Text>
32. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/REG3717?an=17>
33. Про затвердження Порядку розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/337-2019-%D0%BF#Text>
34. ДСТУ EN IEC 61000-4-3:2021 Електромагнітна сумісність. Частина 4-3. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливність до радіочастотних електромагнітних полів.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96887