

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

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**“Дослідження системи електропостачання та
енергозбереження насосної станції зона II-A
м.Кропивницький”**

Виконала здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕНМ-22М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Валерія ДОВЖУК
« ____ » _____ 2023 р.

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

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., профессор

Петро ПЛЄШКОВ

« » 20 p.

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

Довжук Валерії Юріївни

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Дослідження системи електропостачання та енергозбереження насосної станції зона II-А м.Кропивницький**

Study of the power supply and energy saving system of the pumping station zone II-A in the city of Kropyvnytskyi

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

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 25.12.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____
Вступ; Вимоги до проектування насосних станцій; Особливості роботи насосної
станції другого підйому; Система заходів з енергозбереження насосної
станції; Управління асинхронним двигуном за допомогою тиристорного
перетворювача напруги; Застосування частотно-регульованого електроприводу
агрегатів насосної станції; Економічна ефективність впровадження
перетворювачів частоти; Охорона праці ; Висновки

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	15.10.23	
2	<i>Вимоги до проектування насосних станцій</i>	28.10.23	
3	<i>Особливості роботи насосної станції другого підйому</i>	7.11.23	
4	<i>Система заходів з енергозбереження насосної станції</i>	16.11.23	
5	<i>Управління асинхронним двигуном за допомогою тиристорного перетворювача напруги</i>	18.11.23	
6	<i>Застосування частотно-регульованого електроприводу агрегатів насосної станції</i>	24.11.23	
7	<i>Економічна ефективність впровадження перетворювачів частоти</i>	02.12.23	
8	<i>Охорона праці</i>	10.12.23	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	22.12.23	
10	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	25.12.23	

Дата видачі завдання
Підпис керівника _____

«____» _____ 2023 р.
Петро ПЛЕСХОВ

Завдання прийнято до виконання
Підпис здобувача _____

«____» _____ 2023 р.
Валерія ДОВЖУК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 116 с.; 37 рис.; 6 табл.; 15 джерел.

Довжук В.Ю. Дослідження системи електропостачання та енергозбереження насосної станції зона II-A м.Кропивницький. – Рукопис.

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

Об'єктом досліджень є насосні установки насосної станції зона II-A м.Кропивницький.

Предмет досліджень – система керування асинхронним двигуном за допомогою тиристорного перетворювача напруги та системи керування з частотно-регульованим електроприводом.

Метою роботи є розробка енергозберігаючих заходів насосної станції II підйому.

В роботі було проведено дослідження системи електропостачання з оптимальним використанням електрообладнання для впровадження енергозберігаючих систем насосних агрегатів.

Основна частина роботи присвячена розробці методів з енергозбереження в насосних установках. Запропоновано до впровадження тиристорний перетворювач напруги, головним застосуванням якого є реалізація м'якого пуску асинхронних електродвигунів та динамічного гальмування, а також для створення систем автоматичного регулювання швидкості.

Оптимальним рішенням для вирішення проблем енергозбереження у системах водопостачання стало використання частотно-регульованого асинхронного електроприводу, що сприяє заощадженню електроенергії, пов'язане з переходом до енергоефективного управління, і відмовою від регулювання тиску води шляхом використання дроселів.

За результатами досліджень зроблено висновки щодо ефективності впровадження запропонованих заходів в технологічні системи насосних станцій.

Ключові слова: насосна установка, регульований асинхронний електропривод, тиристорний перетворювач напруги, частотно-регульований електропривод, плавний пуск, енергозбереження.

ABSTRACT

Qualification work: 115 p.; 37 Fig.; 6 tab.; 16 sources.

Dovzhuk V.Yu. Study of the power supply system and energy saving of the pumping station zone II-A, Kropyvnytskyi. - Manuscript.

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

The object of research is the pumping units of the pumping station, zone II-A, Kropyvnytskyi.

The subject of research is an induction motor control system using a thyristor voltage converter and a control system with a frequency-regulated electric drive.

The purpose of the work is the development of energy-saving measures of the pumping station of the II lift.

In the work, a study of the power supply system with optimal use of electrical equipment for the implementation of energy-saving systems of pumping units was carried out.

The main part of the work is devoted to the development of energy saving methods in pumping installations. A thyristor voltage converter is proposed for implementation, the main application of which is the implementation of soft start of asynchronous electric motors and dynamic braking, as well as for the creation of automatic speed control systems.

The optimal solution for solving the problems of energy saving in water supply systems was the use of a frequency-regulated asynchronous electric drive, which contributes to the saving of electricity, associated with the transition to energy-efficient management, and the rejection of water pressure regulation through the use of throttles.

Based on the results of the research, conclusions were made regarding the effectiveness of the implementation of the proposed measures in the technological systems of pumping stations.

Keywords: pump installation, adjustable asynchronous electric drive, thyristor voltage converter, frequency-regulated electric drive, soft start, energy saving.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	7
1	ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ДРУГОГО ПІДЙОМУ.....	9
2	ВИМОГИ ДО ПРОЕКТУВАННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ	16
	2.1.Класифікація насосних станцій.....	16
	2.2. Вимоги до проектування насосних станцій II підйому.	18
	2.3.Види насосів, застосовуваних в системах водопостачання.....	23
	2.4.Автоматичні гідропневматичні установки.....	27
	2.5.Пневматичні водонапірні установки.....	31
	2.6.Економічні показники роботи насосної станції.....	33
3	СИСТЕМА ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ.....	37
	3.1. Правильний підбір типу та потужності насосу.....	37
	3.2. Регулювання швидкості насосів.....	38
	3.3. Утеплення трубопроводів.....	39
	3.4. Регулярне обслуговування насосних установок.....	40
	3.5. Моніторинг та автоматизація насосного обладнання.....	41
	3.6. Використання ефективних матеріалів.....	42
	3.7. Водовідновлення систем.....	43
	3.8. Заміна енергоємного насосного обладнання.....	44
	3.9. Впровадження частотно-регульованого електроприводу двигунів насосів.....	46
	3.10. Комп'ютеризація технологічних процесів насосних станцій.....	51
4	УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ.....	57

	4.1. Тиристорний перетворювач напруги як засіб регулювання.....	57
	4.2. Регулювання швидкості в розімкнутій системі «ТПН – АД».....	60
	4.3. Регулювання швидкості в замкнутій системі «ТПН – АТ».....	61
	4.4. Забезпечення режиму енергозбереження при недовантаженому електроприводі змінного струму на основі ТПН.....	63
5	ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АГРЕГАТИВ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ.....	71
	5.1. Доцільність впровадження частотно-регульованого електроприводу в насосних установках.....	71
	5.2. Впровадження перетворювача частоти.....	80
	5.3. Використання перетворювачів частоти в автоматизованих системах керування.....	85
	5.4. Електромагнітна сумісність (ЕМС) перетворювача частоти з мережею живлення.....	87
	5.5. Плавний пуск високовольтних електродвигунів насосних установок.....	92
6	ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ.....	97
	6.1. Оцінка економічної ефективності від впровадження перетворювачів частоти.....	97
	6.2. Розрахунок річної економії енергоресурсів та терміну окупності устаткування.....	99
7	ОХОРОНА ПРАЦІ	104
	ВИСНОВКИ.....	113
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	114

ВСТУП

Енергозбереження насосних установок є важливою задачею для підприємств та організацій, оскільки насоси вимагають значних обсягів енергії для своєї роботи.

Насосні станції другого підйому, як правило, використовуються для підняття рідини або іншого середовища на вищий рівень. Вони оснащені насосами, які використовуються для підняття рідини або іншого середовища з одного рівня на інший. Це може бути вода, стічні води, нафта або інші рідини. Вище рівнем, на який піднімається рідина, розташований збірний резервуар або резервуари, які служать для зберігання і, за необхідності, регулювання рідини.

Насосні станції другого підйому зазвичай обладнані системами керування і автоматикою, що дозволяють вмикати і вимикати насоси в залежності від рівня рідини в резервуарі і інших параметрів, таких як тиск або потік. Для безперебійної роботи насосних станцій важливий постійний моніторинг їх функціонування і систем резервування на випадок відмови. Регулярне технічне обслуговування та відповідне управління дозволяють підтримувати нормальну роботу системи.

Для живлення насосів і систем керування насосні станції зазвичай підключаються до електромережі або інших джерел енергії. Важливий аспект - це безпека. Насосні станції повинні бути обладнані системами безпеки, які включають в себе системи відслідковування витоків, запобіжні пристрої, а також заходи для запобігання аваріям та захисту персоналу.

Важливо зазначити, що конструкція та принцип роботи насосних станцій може значно відрізнятися в залежності від їх призначення, типу рідини та специфікацій об'єкта.

Джерелом водопостачання для магістрального районного водопроводу "Дніпро-Кіровоград" є води Дніпра. Вода забирається для Дніпровської водоочисної станції (ДВС) і Водопровідних очисних споруд

(ВОС), а підземні водозабори "Лелеківський" і "Холодні ключі" обслуговують місто Кропивницький, "Ново-Пилипівський" – місто Олександрію. Ці джерела забезпечують питною водою місто обласного підпорядкування, прилеглі сільські населені пункти, де проживає біля 500 тисяч жителів.

Магістральний районний водопровід "Дніпро-Кіровоград" (МРВ "Дніпро-Кіровоград") - це система централізованого водопостачання з проектною потужністю 168 тис. м³/доб. Складові МРВ "Дніпро-Кіровоград" включають магістральний трубопровід (деякі ділянки в три нитки), насосну станцію I-го підйому, комплекс ДВС, який включає насосну станцію II-го підйому (1 РЧВ-10тис.м³, 1 РЧВ-5тис.м³, 1 РЧВ-3,4м³), а також водопровідні підвищувальні насосні станції "Олександрія", "Пантаївка", "Знам'янка" та Зона I. Вода, яка поступає з Дніпра, проходить знезараження та транспортується на відстань 120 км по магістральним трубопроводам.

У рамках магістерської роботи розглянуто енергозберігаючу систему управління насосною станцією (НС) II підйому. Основними споживачами електроенергії в цій насосній станції є асинхронні двигуни.

У складі насосної станції розташовано чотири асинхронних двигуни потужністю 200 кВт (один із них є резервним). Електропостачання для цих двигунів здійснюється через трансформаторні підстанції ТП-10/0,4 кВ.

1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ДРУГОГО ПІДЙОМУ

Насосна станція (НС) використовується для переміщення рідини із джерела водозабору або резервуару чистої води у систему водопостачання (МВ). Воду, яку взяли з джерела водозабору, насосами станції першого підйому направляють до очисних споруд. Після очищення вода потрапляє до резервуару чистої води. Друга група насосів, розташованих на НС другого підйому, піднімає воду з цього резервуару і через водовідвідні системи постачає її до системи водопостачання (МВ), яка постачає воду споживачам. Якщо система водопостачання має велику протяжність, то вона обладнується НС третього підйому, де насоси підвищують тиск води в трубопроводах до необхідного рівня.

Для досягнення необхідної продуктивності, насосна станція (НС) другого підйому використовує групу насосних агрегатів (НА), які функціонують паралельно. Ця група подає воду в трубопровідну систему за допомогою двох водоводів. При такому з'єднанні кожен насос у групі впливає на роботу інших насосів цієї групи. Це призводить до того, що обсяг постачання, тиск, потужність і коефіцієнт корисної дії (ККД) кожного з них значно залежать від режимів навантаження агрегатів, які працюють у сумісному режимі.

При ідентичних насосах підключення другого насоса паралельно першому призводить до подвоєння обсягу постачання лише у випадку, коли загальний трубопровід системи не створює значного гідравлічного опору. Зі збільшенням гідравлічного опору трубопроводу його характеристика стає більш крутою, і збільшення сумарної подачі при підключенні другого насоса зменшується. Також спостерігається оборотне явище: при відключенні одного із насосів, що працюють паралельно, інші, які залишились в роботі, автоматично підвищують обсяг постачання і потужність. Це пояснюється тим, що при відключенні одного насоса обсяг постачання системи

зменшується, гідравлічний опір загального трубопроводу знижується, тиск у вузловому перерізі падає, і залишаються в роботі насоси працюють при зниженому тиску. Проте при звичайних формах характеристик зниженню тиску відповідає збільшення обсягу постачання і збільшення потужності.

Відповідно до [6], робочі насоси мають певну кількість резервних, які необхідно перевіряти не рідше одного разу за десять днів. Найкраще, якщо насосні агрегати з однаковою робочою характеристикою працюють черговим чином для забезпечення постійної ефективності.

Необхідним елементом гідравлічної системи є зворотні клапани та засувки на напірних лініях регульованих насосів, оскільки при роботі на низьких обертах може виникнути зворотний потік рідини. Під час вибору типу насосів і визначення кількості робочих агрегатів важливо враховувати їх сумісну роботу.

Насосна станція (НС) другого підйому працює за ступінчастим графіком. Не завжди можна забезпечити необхідне значення продуктивності станції. Неспівпадіння цього значення з потребами споживача призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) паралельно працюючих агрегатів, що в кінцевому підсумку призводить до додаткових витрат електричної енергії. Якщо споживання води в мережі перевищує обсяг, який подає насосна станція, то насоси працюватимуть з низьким ККД. З іншого боку, якщо витрати в мережі менше, ніж подача насосів, то за допомогою саморегулювання насоси будуть підвищувати тиск, що перевищує необхідний для мережі. Це, в свою чергу, призведе до зменшення загального ККД НС.

До особливостей роботи насосних станцій слід віднести і те, що обладнання, якими вони оснащуються зазвичай має достатньо великий запас по потужності [6]. Тому в трубопровідній мережі виникає надлишок тиску, а НА станції працюють з невисокими значеннями ККД. Крім того, значна протяжність споживача (населений пункт), розподілена трубопровідна мережа та різна висота підйому рідини для споживача зумовлює і

нерівномірність розподілу тиску. Внаслідок чого НС вимушена працювати з підвищеним значенням тиску на напірному трубопроводі, що також погіршує ефективність роботи всієї системи водопостачання.

Отже, для забезпечення роботи при номінальних значеннях тиску необхідно регулювати продуктивність насосної станції (НС). Існують різні методи для зміни продуктивності окремо працюючих насосів, але кількість способів регулювання продуктивності групи насосів, які працюють паралельно, обмежена.

У сучасному розвитку техніки ефективним способом регулювання продуктивності насосної станції є використання регульованого електроприводу [4]. Застосування цього методу може призвести до зменшення енергоспоживання турбомеханізмів на 25%.

При визначенні кількості регульованих насосів слід враховувати, що зниження швидкості обертання одного з насосів може призвести до перевантаження нерегульованих насосів, вивести робочі точки останніх за межі робочої зони, знизити коефіцієнт корисної дії (ККД) і в не вигідних умовах викликати кавітацію. В цьому випадку регульований електропривід повинен бути встановлений на всіх насосах, і зміна частоти обертання насосів, які працюють паралельно, повинна відбуватися одночасно на однакове значення. Синхронізована зміна частоти обертання забезпечується керуванням всіх насосів від загальної системи автоматики.

Використання регульованого електроприводу, крім економічної вигоди та плавного регулювання, дозволяє підвищити продуктивність насосної станції, не збільшуючи виробничі площі. Це досягається збільшенням одиничної потужності насосних агрегатів, оскільки їхні габаритні розміри зростають значно повільніше, ніж потужність та продуктивність [4].

У [4] вказується, що використання регульованого електроприводу в системах водопостачання дозволяє не лише зменшити електроспоживання насосів, але і поліпшити умови роботи самої системи. Це означає

"виключення непотрібних для комфортного водопостачання надлишків тиску, що виникають в процесі роботи системи водопостачання - при зміні витрат, зростанні тиску в магістральних гідромережах і т. д.". Для існуючих систем комунального водопостачання кожен зайвий атмосферний тиск, за рахунок більш сильних витоків з трубопроводу, призводить до втрат води в розмірі 7-9%.

При використанні регульованого електроприводу найкращі економічні показники досягаються в системах з керованими перетворювачами частоти [10]. Висока ефективність впровадження регульованого електроприводу (РЕП) та керованих систем частотної регуляції (КСК) на насосних станціях підтверджується аналізом виробництва провідних світових виробників насосного обладнання та матеріалів, а також публікаціями наукових досліджень у цій галузі. У випадку, коли на насосній станції встановлені регульовані та нерегульовані електроприводи, при керуванні ними необхідно передбачити зміну частоти обертання не тільки регульованих насосних агрегатів, але й зміну кількості працюючих нерегульованих агрегатів. При цьому включення чи вимкнення нерегульованих двигунів повинно відбуватися одночасно, до того як подача регульованого насосного агрегата зменшиться до нульового значення, щоб уникнути роботи насоса в зоні низьких коефіцієнтів корисної дії [4].

Сучасний рівень розвитку техніки ставить перед насосними станціями вимоги до широкого впровадження сучасних систем автоматики та автоматизації. Конструкція насосної станції повинна бути готовою до модернізації і розширення, а також можливості заміни існуючого обладнання на більш потужне, здатне забезпечити зростання подачі і тиску. Зокрема, важливо враховувати, що багато насосних станцій вже вичерпали свій ресурс безвідмовної роботи і продовжують працювати зі застарілим обладнанням.

Такі вимоги ставлять перед обслуговуючим персоналом завдання ефективно керувати насосним устаткуванням станції, враховуючи наробіток обладнання, доцільність регулювання, енергоефективність та інші фактори.

Також існують випадки, коли насоси з різними характеристиками працюють паралельно, що ускладнює їхнє керування і може призводити до проблем, таких як поломки, невиправдані витрати енергії та інші. Неправильне управління групою насосних агрегатів може вести до роботи деяких з них за межами оптимальної робочої зони, з низьким коефіцієнтом корисної дії та великим споживанням енергії.

На практиці виявлено можливість ефективного керування групою насосів, що працюють паралельно, за допомогою електроприводу серії ALTIVAR 58 від Schneider-Electric. Для реалізації цієї можливості він оснащується додатковою платою, яка дозволяє автоматично керувати групою до 5 насосів за допомогою лише одного перетворювача частоти, забезпечуючи при цьому стабільний тиск в трубопроводі навіть при зміні витрат.

Основний принцип керування полягає в тому, що встановлено певне значення продуктивності, яке один регульований насосний агрегат може забезпечити. При перевищенні цього значення перетворювач частоти видає сигнал на ввімкнення нерегульованого додаткового насоса. Одночасно з цим частота обертання регульованого насоса автоматично зменшується. Навпаки, якщо потрібне значення витрат зменшується нижче визначеного рівня, перетворювач частоти видає сигнал на зупинку нерегульованого насоса, а його продуктивність автоматично переходить на регульований. Також зазначено, що вибір регульованого насоса та послідовність ввімкнення нерегульованих відбувається за одним із дев'яти алгоритмів керування насосами на платі управління.

Існують станції управління регульованим електроприводом для насосів і вентиляторів під назвою "СУ-ЧЕ" призначені для автоматичного та ручного керування групою насосних агрегатів і вентиляторів, оснащених асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором.

Основні функції станції керування визначаються залежно від її типу. Для неавтоматичних станцій передбачено:

- утримання заданого рівня тиску на виході групи насосних агрегатів;
- забезпечення можливості підключення кожного насоса до перетворювача частоти або мережі;
- можливість керування перетворювачем частоти від системи, яка отримує та обробляє інформацію від об'єкта керування чи самого технологічного процесу, та передачу сигналів керування на перетворювач частоти та насосні агрегати;
- автоматичне перемикання насосів на роботу від мережі у випадку аварії перетворювача частоти;
- забезпечення оперативного управління режимом роботи перетворювача частоти прямо з панелі керування станції;
- можливість ввімкнення та вимкнення кожного насоса кнопками у режимі ручного керування прямим пуском від мережі.

Для автоматичних станцій передбачено:

- утримання заданого рівня тиску на виході групи насосних агрегатів;
- контроль за роботою насосів та автоматичне переключення на резервний насос у випадку аварії робочого;
- автоматичне переключення на роботу насосів від мережі у разі аварії перетворювача частоти;
- автоматичне підключення одного чи двох додаткових насосів при недостатній продуктивності робочого (для станцій з кількістю насосів більше ніж 2);
- автоматичне чергування увімкнених насосів через визначені інтервали часу для забезпечення рівномірного навантаження насосів;
- оперативне керування режимом роботи перетворювача частоти безпосередньо з панелі керування станції;
- можливість запуску та зупинки кожного насоса кнопками у режимі ручного керування прямим пуском від мережі;
- передача сигналів про режими роботи станції на диспетчерський пульта.

До обмежень пропонованого пристрою керування групою насосних агрегатів слід включити неефективність управління насосною станцією, оскільки зміна продуктивності одного насосного агрегата не призводить до відповідної зміни продуктивності всієї станції. Крім того, чергування роботи нерегульованих насосних агрегатів не забезпечує рівномірного розподілу навантаження між насосами.

2 ВИМОГИ ДО ПРОЕКТУВАННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

2.1. Класифікація насосних станцій

Насосні станції систем водопостачання представляють собою складний комплекс гідромеханічного, електричного та автоматичного обладнання, призначений для забезпечення водоподачі відповідно до потреб споживача. Склад споруд, їх конструктивні особливості, тип і кількість основних насосних агрегатів та допоміжного обладнання визначаються з урахуванням принципів, спрямованих на забезпечення надійності, безперебійності водопостачання та комплексного використання водних ресурсів, а також на охорону навколишнього середовища.

У виконанні основної функції насосної станції, якою є подача води, вибір типів та параметрів обладнання є критичним етапом проектування. Цей вибір здійснюється з урахуванням характеристик обладнання, взаємозв'язків між ним, зручності та безпеки його експлуатації.

Енергетичне обладнання основної частини станції включає в себе насоси та привідні двигуни. Залежно від потрібного напору і обсягу подачі, на станції можуть бути встановлені відцентрові, осьові і діагональні насоси. Зазвичай привід для насосів реалізується за допомогою електродвигунів, менше часто використовуються двигуни внутрішнього згоряння, а ще рідше - газо- або парові турбіни. Сукупність, що складається з насоса і привідного двигуна, отримала назву гідроагрегат або просто агрегат. Кількість агрегатів на насосній станції може варіюватися і залежить від розрахункової потужності та категорії надійності. При необхідності великої продуктивності на станції намагаються зменшити кількість агрегатів, збільшуючи при цьому їхню індивідуальну потужність.

Механічне устаткування насосних станцій охоплює підйомно-транспортні механізми та затвори. Підйомно-транспортне устаткування

використовується головним чином для установки та демонтажу обладнання, трубопроводів та їхньої арматури.

Допоміжне обладнання включає системи технічного водопостачання, дренажно-осушувальну, масляну та пневматичну системи, а також вакуум-систему.

Електричне обладнання насосної станції включає силові трансформатори, вводи та виводи високої та низької напруги, розподільні пристрої, струмопроводи до електродвигунів, щити управління, системи контролю та електропристроїв для внутрішніх потреб. **Система електропостачання** повинна відповідати категорії надійності насосної станції, забезпечуючи відповідне резервування вводів живлення та обладнання.

Тип насосної станції обумовлюється її призначенням, подачею, джерелом водопостачання, типом та характеристиками основного обладнання, кліматичними умовами, рельєфом, гідрогеологією місцевості, рівнем води в джерелі та іншими факторами. Це призводить до великої кількості ознак, які визначають типи і конструкції насосних станцій систем водопостачання. Найзначущіші ознаки для класифікації насосних станцій включають насосні станції I і II підйомів, підвищувальні та циркуляційні.

За розташуванням відносно поверхні землі існують три типи насосних станцій: заглиблені (шахтного типу), частково заглиблені (з рівнем 3-4 метри нижче поверхні землі) та наземні (вісь насоса розташована на рівні або вище поверхні землі).

За характером управління розрізняють такі типи насосних станцій: з ручним керуванням, де пуск і зупинка виконуються обслуговуючим персоналом, а контроль за роботою - приладами автоматичного управління; автоматичні, де всі операції - пуск, зупинка, контроль - виконують відповідні прилади-автомати; та з телекеруванням, де автоматичне керування здійснюється на великій відстані від диспетчерського пункту через лінії зв'язку.

2.2. Вимоги до проектування насосних станцій II підйому.

При виборі типу і структури будівлі насосної станції для водопостачання, а також вирішенні питань щодо її комунікацій, слід враховувати необхідність забезпечення оптимальної ефективності енергетичного обладнання, надійності та зручності у використанні, мінімізації втрат напору, надійної функціональності та можливості виконання будівництва в короткі терміни.

У випадку насосних станцій з відцентровими горизонтальними насосами розглядають такі основні схеми розташування агрегатів: однорядне розташування з паралельними до поздовжньої осі станції вісями насосів; однорядне розташування з вісями насосів, що перпендикулярні до поздовжньої осі станції; дворядне розташування агрегатів за шаховим порядком.

Перевагою схеми розташування насосних агрегатів в одному ряду (див. рис. 2.1, а, б) є компактність розміщення обладнання та невелика ширина будівель. В разі використання насосів з двостороннім входом досягається прямолінійний рух перекачуваної рідини та зменшення гідравлічних втрат. Однак при значній кількості насосних агрегатів будівля станції може стати дуже довгою. Тому при великій кількості насосів рекомендується використовувати шахматне розташування агрегатів (див. рис. 2.1, в).

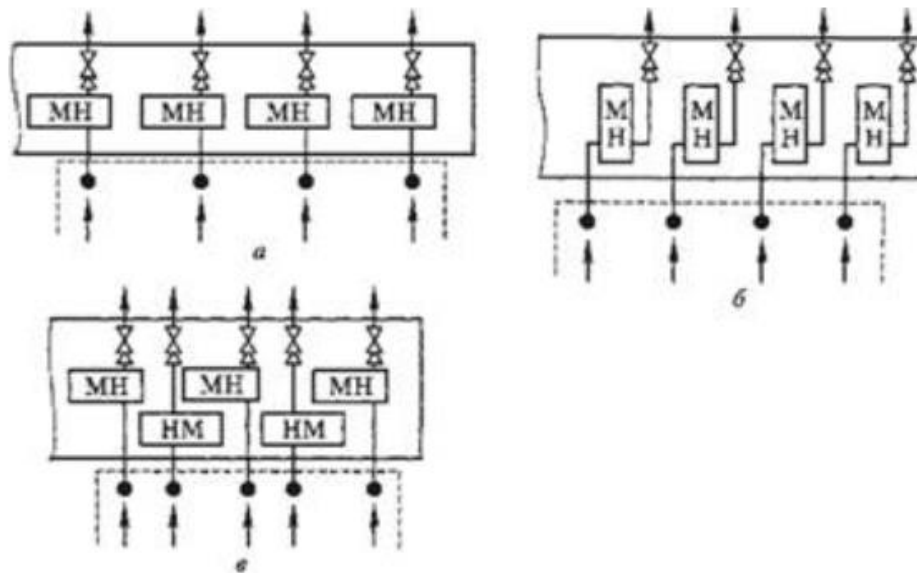


Рисунок 2.1 - Схеми розташування насосних агрегатів (М – двигун; Н – насос):

а, б – однорядне розташування; *в* – шахматне розташування.

Трубопроводи для всмоктуючих і напірних систем насосних агрегатів виготовляються зі сталі. З'єднання труб і фасонних частин виконуються методом електрозварювання, а для монтажу арматури використовують фланці.

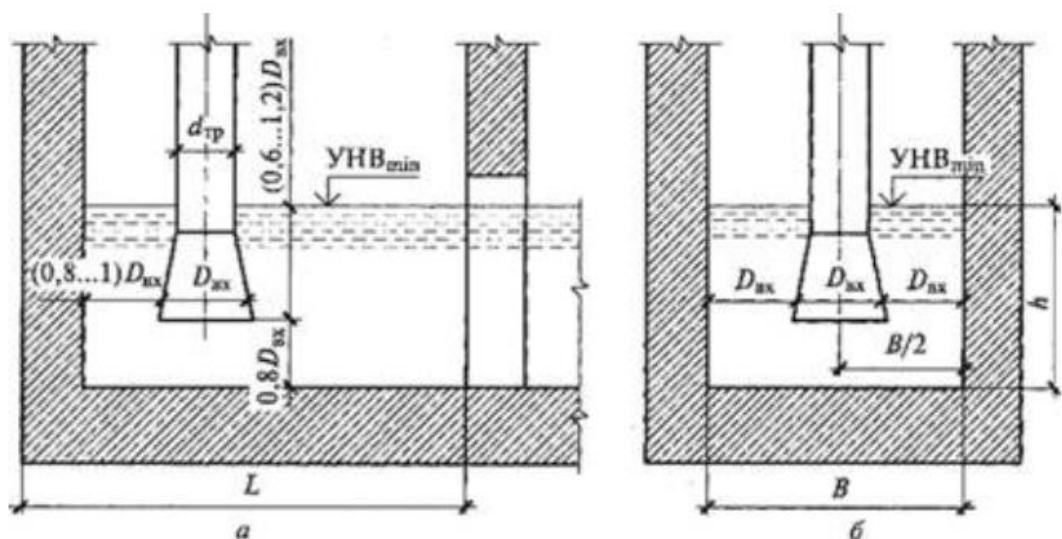


Рисунок 2.2 - Розміщення всмоктуючої труби у приймальній камері:

а - фронтальний переріз; *б* - горизонтальний переріз.

Важливою вимогою до всмоктуючих трубопроводів відцентрових насосів з точки зору надійного і неперервного подачі води є їх повітронепроникність. Численні дослідження та спостереження підтверджують, що потрапляння повітря в міжлопасткові канали робочого колеса насоса негативно впливає на його характеристики. Навіть невеликий вміст нерозчиненого повітря (до 1% в 1 м³ води) може знизити продуктивність насоса на 5-10%. При збільшенні вмісту повітря до 10-15%, насос може втратити всмоктуючу здатність і виникнути зрив у його роботі.

Діаметри всмоктуючих і напірних труб встановлюються на основі техніко-економічного розрахунку, враховуючи швидкість руху води в межах, визначених у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Діаметр всмоктуючих та напірних трубопроводів відповідно швидкості руху води.

Діаметр труби, мм	Швидкість переміщення води по трубопроводах насосних станцій, м / с	
	Всмоктувальні трубопроводи	Напірні трубопроводи
До 250,0	0,6 ... 1	0,8 ... 2
Від 250 до 800	0,8 ... 1,5	1... 3
Більше 800	1,2 ... 2	1,5 ... 4

Безперебійна функціональність насоса та мінімізація гідравлічних втрат у лінії всмоктування також забезпечуються коректним розташуванням всмоктувальних труб у приймальній камері насосної станції (рис. 2.2, а, б).

На рис. 2.3 відображено насосну станцію роздільного типу, що функціонує як станція I підйому у системі водопостачання великого населеного пункту. Станція оснащена трьома насосами Д630-9, два з яких є основними, а один - резервним. Фундаменти насосних агрегатів спроектовані

так, що дозволяють при необхідності замінити насоси на більш потужні моделі, такі як Д1265-65 або Д1600-90.

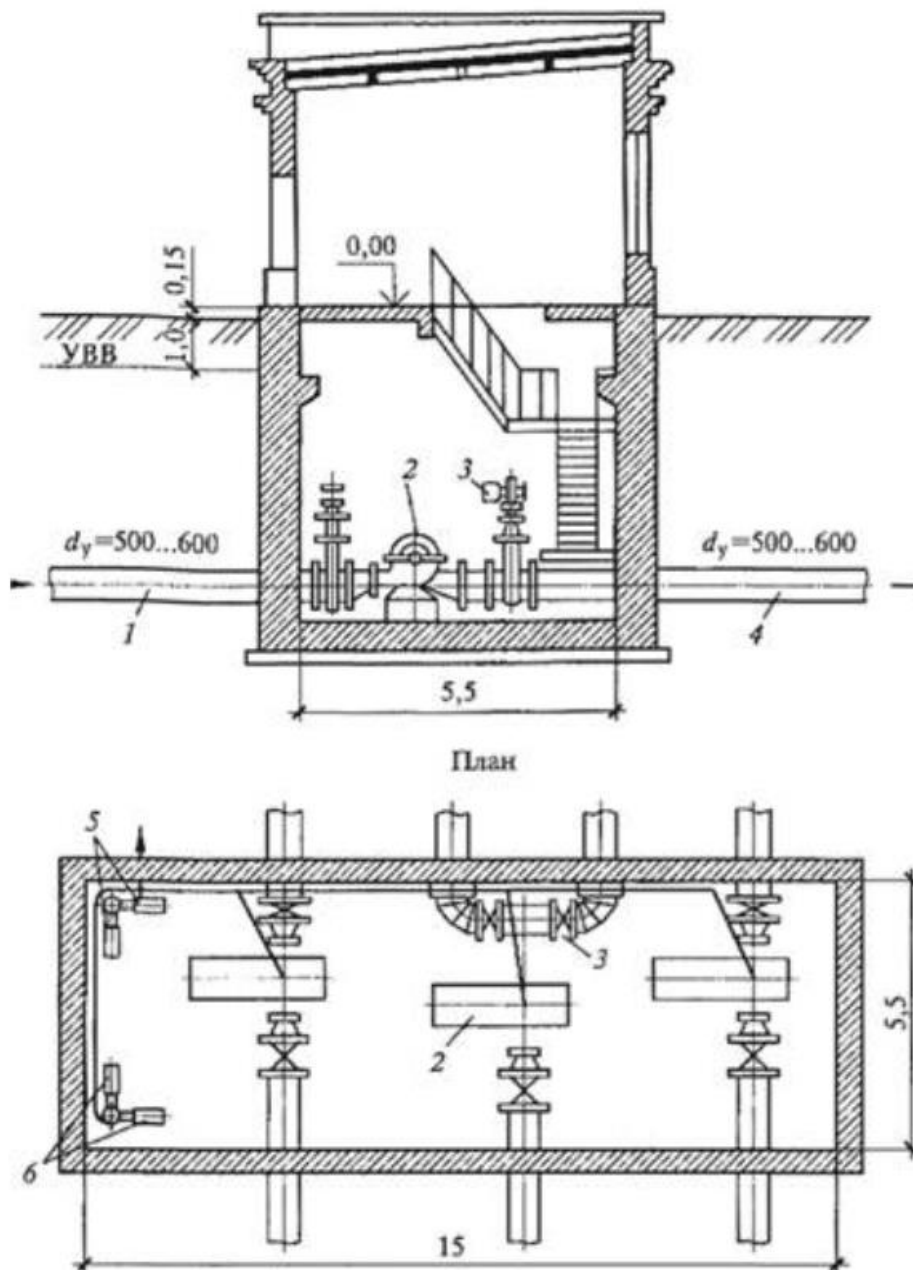


Рисунок 2.3 - Насосна станція I підйому шахтного типу:

1 - всмоктувальний трубопровід; 2 - насос; 3 - засувка із електроприводом; 4 - напірний трубопровід; 5 - дренажні насосні агрегати; 6 - вакуум-насоси.

На рис. 2.4 зображено насосну станцію II підйому, оснащену чотирма насосами. Ширина машинного приміщення становить 12 м, довжина

заглибленої частини - 18 м, а висота над поверхнею землі - 5,4 м. Підлога в насосному приміщенні знаходиться на глибині 2,4 м.

Вода подається до насосів через окремі всмоктувальні труби. На напірній лінії розміщений збірний колектор, від якого відходять два напірних трубопроводи. В колодязях, розташованих на відстані 10 м від станції, встановлені витратоміри типу сопла Вентурі на напірних трубопроводах.

Для встановлення обладнання та проведення ремонтних робіт будівля станції обладнана однобалочним мостовим краном з ручним керуванням. У торці будинку розташовані приміщення для силових трансформаторів, розподільних пристроїв, електрощитового господарства, підсобні приміщення і санітарний вузол.

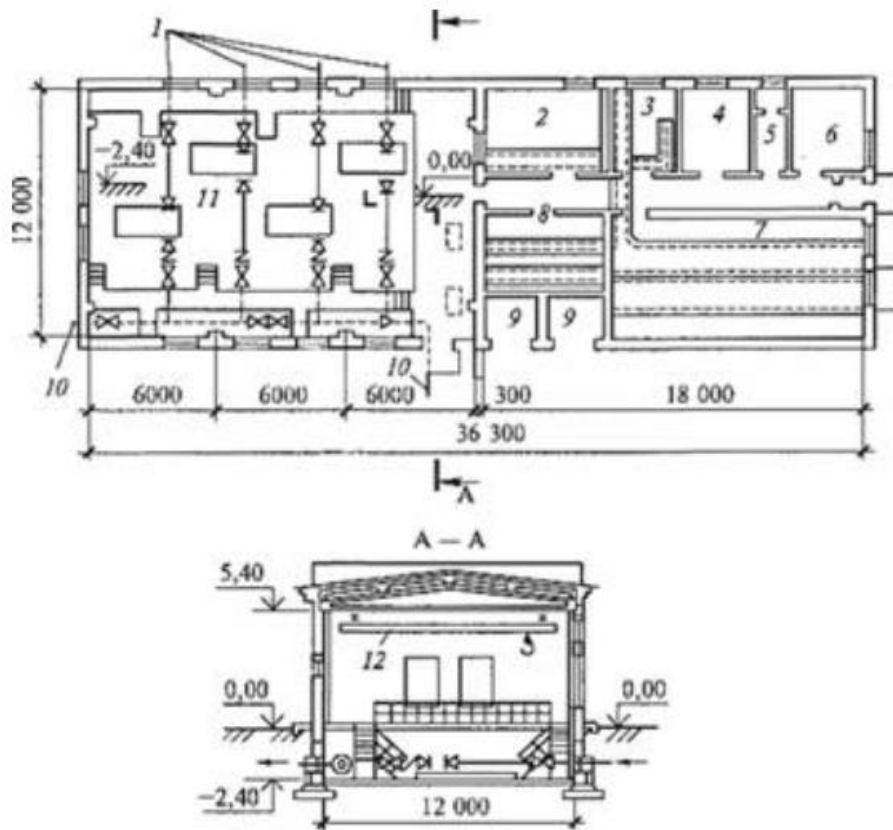


Рисунок 2.4 – План насосної станції II підйому:

1 - всмоктувальні трубопроводи; 2 - побутові будівлі; 3 - випрямлячі; 4 - корпуси статичних конденсаторів; 5 - санвузол; 6 – ремонтна майстерня; 7 - розподільчі пристрої; 8 – щитова кімната; 9 - відділення

трансформаторів; 10 - напірні трубопроводи; 11 - електромашинний зал; 12 - кран-балка.

2.3. Види насосів, застосовуваних в системах водопостачання.

Насоси є однією з найпоширеніших категорій машин, і через складність класифікації за їхнім призначенням, прийнято використовувати класифікацію за принципом їхньої дії. З цього погляду всі існуючі насоси можна розділити на три основні групи.

Лопатеві насоси перетворюють механічну енергію двигуна шляхом динамічної взаємодії потоку рідини, що перекачується, та лопатей обертового колеса. В дану групу включають відцентрові, вихрові, осьові і відцентрово-вихрові насоси.

Об'ємні насоси діють на принципі витіснення рідини з робочої камери шляхом періодичної зміни її обсягу. Сюди належать поршневі, гвинтові, шестеренні та інші насоси.

Насоси тертя працюють шляхом безпосередньої передачі енергії при змішуванні потоків робочої рідини (газу) з рідиною, що перекачується (газом) і має менший запас енергії. До цієї категорії відносяться гідроелеватори, газо- або воздухоструйні насоси.

В залежності від призначення виділяють різні типи насосів: для чистої води; для забруднених вод, таких як стічні динамічні (фекальні); для гарячої води, відомі як теплофікаційні; для перекачування піску - піскові; для переміщення земляного розчину - ґрунтові; для агресивних рідин - хімічні.

За кількістю коліс насоси поділяються на одноколісні, які знаходять широке застосування в комунальних системах водопостачання, і багатоколісні, які, як правило, використовуються в насосах високого тиску. У багатоколісних насосах на робочий вал встановлено кілька робочих коліс, і напір, створений насосом, дорівнює сумі напорів, що створюються кожним робочим колесом.

За створенням напору насоси поділяються на такі категорії: низьконапірні (до 20 м); середньонапірні (від 20 до 60 м); високонапірні (понад 60 м).

За розташуванням валу робочого колеса насоси можуть бути вертикальними або горизонтальними.

До групи насосів з вертикальним валом належать насоси типу А - артезіанські, які мають електродвигун, розташований над гирлом свердловини, і насоси типу ЕЦВ (Е - електродвигун погрузного типу, Ц - відцентровий, В - для підняття води). Ці насоси використовуються для підняття води з артезіанських свердловин.

За методом подачі води до робочого колеса насоси розрізняються за одно- і двостороннім, бічним і осьовим подачами води.

Відцентрові насоси.

Відцентрові насоси мають широке застосування в системах водопостачання та водовідведення. Робота цих насосів базується на взаємодії сил, що виникають від руху лопатей робочого колеса насоса з навколишнім потоком рідини, яку вони перекачують. Схему установки відцентрового насоса можна побачити на рис. 2.5.

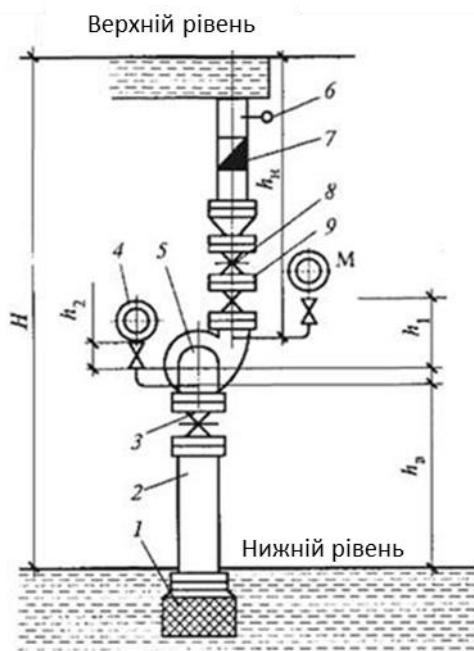


Рисунок 2.5 - Схема обладнання відцентрового насоса:

1 - приймальний клапан; 2 - всмоктувальний трубопровід; 3 - задвижка; 4 - вакуумметр; 5 – насосний агрегат; 6 - запобіжний прилад; 7 - витратомір; 8 - задвижка; 9 - зворотний клапан; *M* – манометр.

Відцентровий насос має основним робочим органом рухливе робоче колесо (рис. 2.6), яке може вільно обертатися в корпусі. При обертанні цього колеса в потоці рідини виникає різниця тисків по обидві сторони його лопастей. Сили тиску лопастей на потік спричиняють обертальний рух рідини, і під дією відцентрових сил виникає поступальний рух рідини, що призводить до збільшення її тиску і швидкості. Робоче колесо закріплене на валу, який виступає як провідник механічної енергії від двигуна. На місці, де вал проходить через отвір у корпусі насоса, встановлюється сальникове (або торцеве механічне) ущільнення, що запобігає витоку рідини з корпусу.

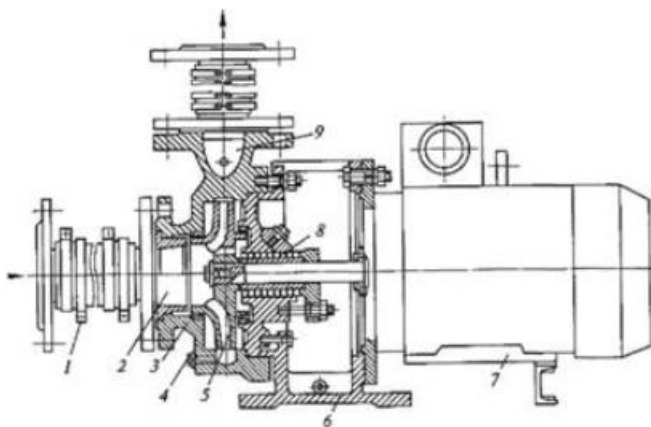


Рисунок 2.6 – Схема консольного відцентрованого насоса:

1 - вібровставка; 2 - вхідний патрубок; 3 - корпус насоса; 4 - робоче колесо; 5 - лопасть робочого колеса; 6 - кріпильний майданчик; 7 - електропривод; 8 - сальник; 9 - вихідний патрубок.

Корпус насоса використовується для структурного об'єднання всіх компонентів, направлення потоку рідини до робочого колеса через всмоктуючий патрубок, відведення води через напірний патрубок і перетворення динамічного (швидкісного) напору потоку, що виходить з колеса, в статичний напір (тиск).

Перед введенням в роботу корпус насоса і всмоктуючий трубопровід наповнюються рідиною. При обертанні робочого колеса рідина, яка заповнює канали між лопатями колеса, за дії відцентрової сили відкидається від центру колеса до його периферії і потрапляє у спіральну камеру (равлик), а потім - в нагнітальний трубопровід. Одночасно в центральній частині насоса перед входом рідини в робоче колесо виникає розрідження; під впливом атмосферного тиску на поверхню води в джерелі вода по всмоктуючому трубопроводу потрапляє у насос.

У відцентровому насосі встановлюються наступне обладнання та арматуру:

- Приймальний клапан із сіткою призначений для утримання в корпусі насоса і в всмоктуючому трубопроводі води під час заливки насоса перед запуском.
- Засувка на всмоктуючому трубопроводі встановлюється у випадках, коли насос розташований під затокою або всмоктуюча лінія насоса приєднана до загального всмоктуючого трубопроводу.
- Вакуумметр призначений для визначення вакуумметричної висоти всмоктування і приєднується до всмоктуючого патрубку насоса.
- Манометр встановлюється на напірному патрубку насоса для визначення напору, що створюється насосом.
- Зворотний клапан запобігає зворотньому русі води з напірного трубопроводу.
- Засувка на напірному трубопроводі використовується для відключення насоса від напірного трубопроводу і, у деяких випадках, для регулювання подачі і напору насоса. Вона встановлюється безпосередньо за зворотним клапаном.
- Витратомір використовується для визначення подачі (витрати) насоса.
- Запобіжний клапан захищає насос і трубопровід від підвищеного тиску, що може виникнути при гідравлічному ударі.

2.4. Автоматичні гідропневматичні установки.

Характер споживання води визначає деякі особливості систем місцевого водопостачання. Зазвичай свердловини розташовуються неподалік від об'єкту. В системах такого водопостачання відсутні розгалужені зовнішні мережі та великі споруди для обробки і зберігання запасів води. Ключовим елементом таких систем є насосна установка, яка включає напірно-регулюючий резервуар і контрольно-вимірювальну апаратуру. Установки цього типу мають ряд специфічних вимог, серед яких важливі: простота і компактність конструкції; можливість масового виробництва та розміщення без будівництва спеціальних приміщень (у підземних колодязях або безпосередньо в обслуговуваних будівлях); надійність та простота в експлуатації; автоматична робота без постійного обслуговуючого персоналу; доступна вартість установки та її монтажу; легкість ремонту та заміни окремих вузлів та деталей установок. Відповідь на всі ці вимоги надають автоматичні насосні установки з гідропневматичними баками (рис. 2.7), які все більше застосовуються у вітчизняній та зарубіжній практиці водопостачання.

Автоматичне ввімкнення та вимкнення насоса залежно від тиску в гідропневматичних баках регулюється за допомогою команди реле тиску, яке управляє пусковою електроапаратурою. Це забезпечує не лише захист електродвигуна від технологічного перевантаження, але й від струмів короткого замикання та струмів, спричинених втратою фази.

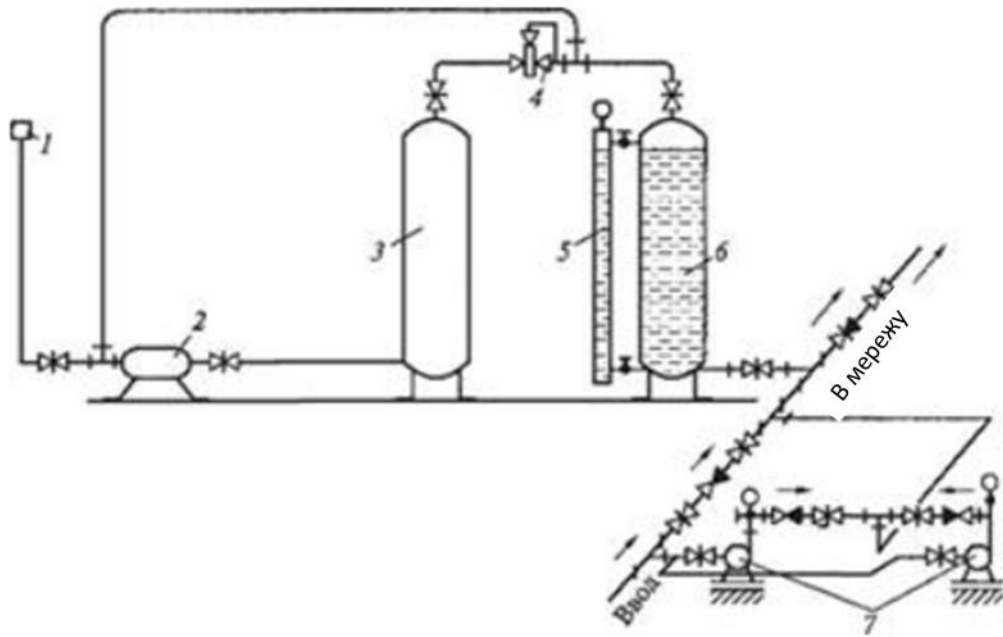


Рисунок 2.7 - Схема гідропневматичної установки постійного тиску:

1 - фільтр приймання повітря; 2 - компресор; 3 - повітряний резервуар; 4 - редукційні клапани (регулятор тиску); 5 - вказівник рівня; 6 - резервуар води; 7 – насоси.

Додавання та регулювання об'єму повітря в баку установки проводяться за допомогою пристрою для впуску повітря, який відповідає на імпульс, надісланий регулятором запасу повітря.

Принципи розміщення насосного обладнання.

При розташуванні насосного обладнання, запірно-регулюючої арматури та трубопроводів насосної станції слід керуватися наступними вимогами:

1. Зручність експлуатації та безпека обслуговування:
 - Забезпечення легкості управління насосними агрегатами і запірно-регулюючою арматурою.
 - Забезпечення безпечних умов для обслуговування обладнання.
2. Простота ремонту, монтажу і демонтажу:
 - Забезпечення легкості проведення ремонтних робіт.
 - Можливість швидкого монтажу та демонтажу агрегатів, арматури і допоміжного обладнання.

3. Мінімальні площі і глибина машинного залу:

- Оптимізація розміщення обладнання для мінімізації потрібної площі та глибини машинного залу.

4. Максимальна простота всмоктувальних комунікацій:

- Забезпечення мінімальних втрат напору в всмоктувальних комунікаціях.

5. Можливість розширення насосної станції в перспективі:

- Забезпечення можливості легкого розширення насосної станції при необхідності.

Розташування насосних агрегатів у конструкції насосної станції визначається особливостями конструкції обраних насосів, зокрема взаємним розташуванням всмоктуючого і напірного патрубків щодо один одного та відносно осі обертання валу. Архітектурна форма насосної станції у плані та розташування машинного залу відносно земельної поверхні (насосна станція заглиблена чи незаглиблена) також впливають на компоновку насосних агрегатів.

У насосних станціях, які мають прямокутну форму в плані та не заглиблені або частково заглиблені (наприклад, насосні станції I підйому роздільного тваню та насосні станції II підйому), використовуються однорядна (рис. 2.8, а ... е) і дворядна (рис. 2.8 ж, з) схеми розміщення насосних агрегатів. Зображені на рис. 2.6 а ... в, ж, з схеми використовуються для насосів типу Д. Зокрема, у схемах ж і з використовується конструктивна особливість цих насосів, що дозволяє приєднувати електродвигун як з одного боку, так і з іншого, з метою зменшення площі машинного залу.

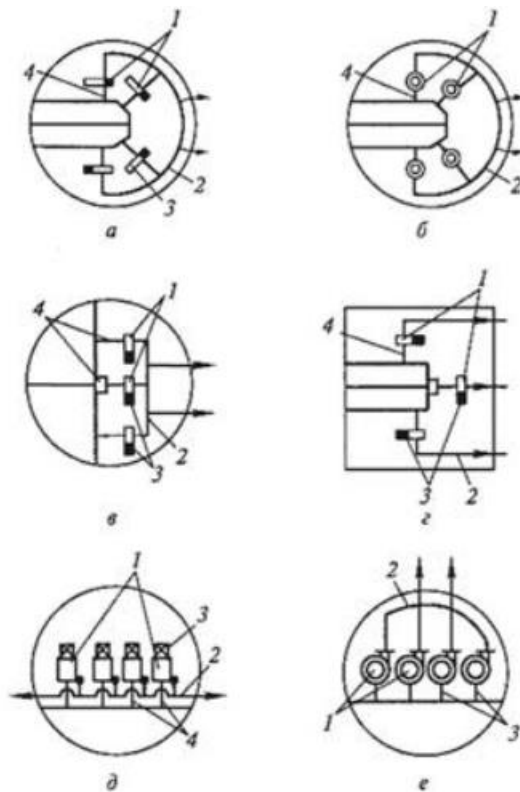


Рисунок 2.9 - Компонування насосних агрегатів у формі кола:

a...г - в насосних станціях I підйому з'єднаного типу; *д, е* - на каналізаційних насосних станціях; 1 - насоси, 2 - напірні трубопроводи; 3 - електроприводи; 4 - всмоктувальні трубопроводи.

Згідно з схемами, які представлені на рисунках 2.9 *а, в ... д*, у насосних станціях встановлюють горизонтальні насоси типу Д, тоді як за схемою *в, е* використовують вертикальні насоси типу В.

У машинних залах передбачено монтажний майданчик для розташування насосних агрегатів. Його розміщення повинно бути таким, щоб будь-який насосний агрегат можна було демонтувати і перемістити на вказаний майданчик за допомогою підйомно-транспортних механізмів.

2.5. Пневматичні водонапірні установки

Пневматичні водонапірні установки призначені для заміщення традиційних водонапірних башт. Вони ефективно застосовуються при об'ємах витрат до 100 м³ / год і високих значеннях напору.

Така установка складається з повітряних та водяних сталевих баків або єдиного водоповітряного бака, компресора та насосних агрегатів (див. рис. 2.10).

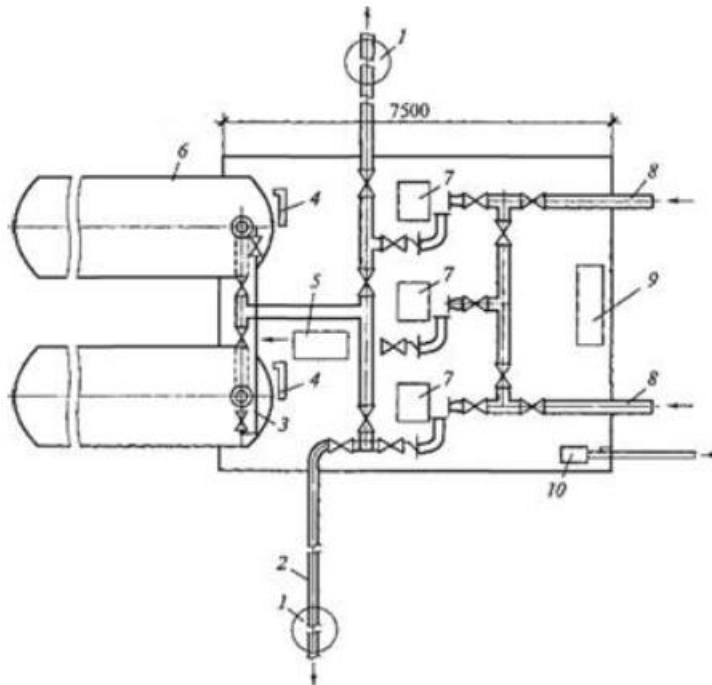


Рисунок 2.10 - Пневматична насосна станція:

1 - колодязь із витратоміром; 2 - напірні трубопроводи; 3 – повітропровід, що йде від компресора; 4 - запобіжник; 5 - компресор; 6 - підземні водоповітряні резервуари; 7 - насоси; 8 - всмоктувальні трубопроводи; 9 - щитова електрообладнання; 10 - дренажний електронасос.

Системи пневматичних установок можуть бути класифіковані як системи з постійним і змінним тиском.

У системі з постійним тиском на трубі, яка з'єднує повітряний резервуар із водяним, встановлюється редукційний клапан, що допускає повітря під заданим тиском. Коли вода надходить в водяний резервуар, повітря виводиться через клапан, який регулюється на постійний тиск.

Системи пневматичних установок з постійним тиском дозволяють використовувати насос в постійному оптимальному режимі, однак вони вимагають постійної роботи компресора.

У пневматичних системах із змінним тиском, при подачі води в резервуар, повітря стискається до максимального тиску. Під час витрати води з резервуара тиск в ньому падає до мінімального розрахункового рівня. Робота компресора обмежується лише поповненням втрат повітря. У таких установках відбувається значне коливання напору, і насоси працюють більшу частину часу поза оптимальною межею режиму.

2.6. Економічні показники роботи насосної станції.

Основними економічними показниками функціонування насосної станції є ефективність роботи самої станції, тобто ККД насосної станції та питома витрата електроенергії (або умовного палива).

Коефіцієнтом корисної дії насосної станції (η_{nc}) називають показник, який визначає ефективність конвертації енергії, витраченої на електропостачання насосної системи, у корисну роботу, а саме підняття рідини або перекачування робочого середовища. Цей коефіцієнт виражається у відсотках і визначається наступним чином:

$$\text{ККД} = \frac{\text{Корисна потужність води (виведена насосом)}}{\text{Електрична потужність, витрачена на насосну станцію}} \times 100\%$$

Для насосної станції цей коефіцієнт визначається за формулою:

$$\eta_n = \frac{N_n}{N_B}$$

де N_n - корисна потужність насосної станції, кВт·год; N_B - споживана потужність валу насосної станції, кВт·год.

Потужність насосної станції визначається потужністю насосів. Потужність насоса N_n Вт(кВт) – це робота, що виконана насосом за одиницю часу t :

$$N_n = \frac{A}{t},$$

$$\text{Робота } A = pQtgH,$$

де p - щільність рідини, кг/м³;

Q - продуктивність насоса, м³/с;

H - повний напір насосної установки, м;

t - час, години (с)

Тоді потужність N_n , Вт:

$$N_n = \frac{pQtgH}{t} = pgQH ,$$

Корисна потужність насоса N_n Вт:

$$N_n = pgQH,$$

Для води: при Q , л/с, H , м, $g=9,81$ м/с² :

$$N_n = \frac{gQH}{1000} :$$

Якщо насосна станція працює рівномірно протягом доби, з витратою Q_{nc} , (м³/с), при напорі H_{nc} (м), то корисну потужність насосної станції можна обчислити за формулою:

$$N_{nc} = \Sigma N_n$$

Потужність на валу насоса N_ϵ , кВт:

$$N_\epsilon = \frac{N_n}{\eta_n} ,$$

де η_n - повний ККД насоса, %;

Повний ККД насоса має враховувати всі втрати (гідравлічні, механічні, об'ємні).

Потужність двигуна насоса $N_{\partial\epsilon}$, кВт,

$$N_{\partial\epsilon} = \frac{N_n}{\eta_n \eta_{\partial\epsilon} \eta_n} \cdot K$$

де η_n - ккд насоса, %; $\eta_{\partial\epsilon}$ - ккд електродвигуна, %; η_n - коефіцієнт передачі, %; K - коефіцієнт запасу при перевантаженні двигуна ($K \approx 1,1 \div 1,5$).

Припустимо, що насосна станція II підйому працює з триступінчатим режимом роботи, на ній встановлено три однотипних насосних агрегати з електроприводами (див. Рис. 2.11).

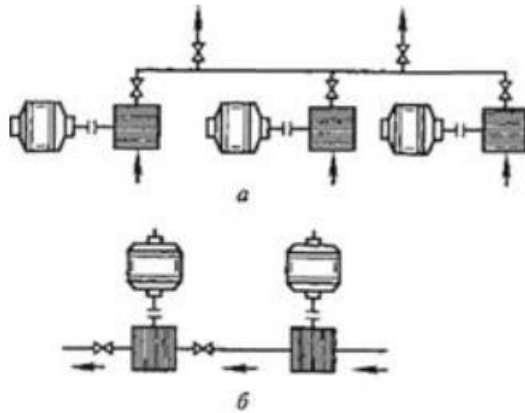


Рисунок 2.11. - Схеми паралельної (а) та послідовної (б) роботи насосів

Коефіцієнт корисної дії насосної станції обумовлюється коефіцієнтами корисної дії насосів.

Коефіцієнт корисної дії насоса η_a , %:

$$\eta_a = \eta_n \eta_{\partial \theta} \eta_v$$

Для групи однотипних насосів, що встановлені на насосній станції, коефіцієнт корисної дії станції η_{nc} , %, дорівнює:

$$\eta_{nc} = \eta_a$$

Для різнотипних насосів коефіцієнт корисної дії станції η_{nc} , %, дорівнює:

$$\eta_{nc} = \frac{Q_{nc}}{\sum \frac{Q_i}{\eta_{a,i}}}$$

де Q_{nc} — продуктивність насосної станції, м³/с;

Q_i - продуктивність кожного із різнотипних насосів, м³/с;

$\eta_{a,i}$ - ККД кожного із насосів, %

Другим економічним показником, який має велике значення у роботі насосної станції, є *питома витрата електроенергії*. Це відношення між фактично витраченою кількістю електроенергії та корисною роботою, яку виконують насоси протягом того ж самого періоду.

Питома витрата електроенергії обчислюється:

$$N_{\text{пит}} = 2,724 / \eta_{\text{нс}}$$

Значним $N_{\text{пит}}$ рахують теоретичну питому норму витрати електроенергії.

Теоретична питома норма витрат електроенергії - це витрата електроенергії, кВт·год, на подачу 1000 т перекачуваної рідини на висоту 1 м при режимі роботи насоса та електропривода з максимальним ККД.

З практики експлуатації насосних агрегатів відомо, що електродвигун майже не змінює свій коефіцієнт корисної дії (ККД) з плином часу, і його значення можна вважати сталим відповідно до паспортних даних. Порівнюючи фактичну питому норму витрати електроенергії, можна визначити реальний ККД насоса. Визначення ККД насоса важливо провести після завершення монтажу перед введенням його в експлуатацію, оскільки можуть виникнути відхилення фактичного ККД від паспортних значень.

Для виявлення можливих змін у коефіцієнті корисної дії (ККД) насоса рекомендується періодично проводити випробування агрегату та визначати його енергетичні характеристики. На станціях I підйому це рекомендується робити двічі на рік, а на станціях II підйому - один раз на рік або на два роки.

Питома норма витрати електроенергії виступає ключовим показником для оптимізації подачі електроенергії на живлення насосної станції.

3 СИСТЕМА ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

Заходи по енергозбереженню в насосних установках допомагають зменшити споживання електроенергії і витрати на експлуатацію, що особливо важливо для підприємств, де насоси використовуються інтенсивно. Зупинимось на загальних способах підвищення ефективності та енергозбереження в насосних системах.

3.1. Правильний підбір типу та потужності насосу.

Правильний вибір насоса допомагає зменшити споживання енергії, забезпечити надійну роботу системи та продовжити термін служби обладнання. Правильний підбір типу та потужності насоса відповідно до потреб дозволяє уникнути надмірного споживання енергії та дуже важливий для забезпечення оптимальної продуктивності та ефективності системи. Для цього визначаються потреби системи:

- потрібний об'єм рідини, який потрібно перекачати (розхід).
- робочий тиск або гідравлічний тиск системи.
- характеристики рідини.

В залежності від характеристик системи обирається тип насоса, такий як центробежний, діафрагмовий, зубчастий, шнековий, перистальтичний тощо.

Для розрахунку потужності насоса враховуються втрати тиску в системі, включаючи трубопроводи, фільтри та інші компоненти. Обирається насос, який забезпечить необхідний робочий тиск та розхід рідини при мінімальному споживанні енергії. При цьому враховуються фактори безпеки, обслуговування та доступності запчастин. Значна увага приділяється вартості насосної установки, витратам на обслуговування та тривалість її служби.

3.2. Регулювання швидкості насосів.

Використання насосів із змінною потужністю (Variable Frequency Drive, VFD) дозволяє регулювати швидкість насосів відповідно до потреби, зменшуючи споживання енергії та є важливим кроком для оптимізації насосних систем та зменшення споживання електроенергії, що веде до значних економічних та екологічних переваг.

Такі системи дозволяють регулювати швидкість обертання насоса і, відповідно, споживану потужність, забезпечуючи оптимальний робочий режим у відповідності до потреб системи. Ось декілька переваг використання насосів із змінною потужністю:

- *Ефективність.*

Насоси зі змінною потужністю дозволяють регулювати розхід та тиск в реальному часі, що сприяє зменшенню зайвого споживання електроенергії. Вони працюють на більш оптимальному рівні ефективності.

- *Збільшення терміну служби.*

Зниження швидкості обертання насоса в моменти низьких навантажень допомагає зменшити знос та збільшити термін служби насосів.

- *Зменшення затрат на обслуговування.*

Споживання енергії та теплові навантаження на насоси зменшуються, що призводить до зменшення затрат на обслуговування та охолодження.

- *М'які запуски та зупинки.*

Використання VFD дозволяє здійснювати плавний запуск і зупинку насоса, що зменшує механічний стрес і підвищує стабільність системи.

- *Можливість адаптації.*

Змінна потужність дозволяє налаштовувати насоси під конкретні умови використання, що особливо корисно для систем, які мають змінні навантаження.

- *Зменшення пускового струму.*

Використання VFD допомагає уникнути значного пускового струму, що може призвести до перенапруги в мережі.

3.3. Утеплення трубопроводів.

Добре ізольовані трубопроводи допомагають утримувати тепло рідини, що проходить через них, зменшуючи втрати енергії.

Способи зменшення втрат в трубопроводах:

- *Зменшення теплових втрат.*

Утеплення трубопроводів допомагає утримувати тепло рідини, яка перекачується по системі. Це особливо важливо для гарячих рідин, таких як гаряча вода чи пара. Без утеплення теплові втрати через стінки труб можуть бути значними. Утеплення зменшує ці втрати тепла, зберігаючи теплу рідину на потрібній температурі.

- *Зменшення конденсації і ризику корозії.*

Утеплення допомагає уникнути конденсації на поверхні трубопроводів, що може виникнути при охолодженні гарячої рідини. Конденсат може призвести до утворення водяної вологи, що може сприяти корозії металевих труб.

- *Зменшення втрат тиску.*

Утеплення може також допомогти зменшити втрати тиску в системі, оскільки рідина залишається гарячою і не охолоджується в трубопроводах, що може вплинути на ефективність насосів і гідравлічну продуктивність системи.

- *Зменшення споживання енергії.*

Внаслідок зменшення теплових втрат та втрат тиску утеплення трубопроводів дозволяє зменшити споживання енергії для підтримки температури і тиску рідини. Це призводить до зменшення витрат на опалення чи охолодження рідини, а також до зменшення споживання енергії на насосні системи.

Утеплення трубопроводів є важливим заходом для підвищення ефективності системи та зменшення витрат енергії, особливо в системах з гарячою або холодною рідиною.

3.4. Регулярне обслуговування насосних установок.

Регулярна перевірка та обслуговування насосів, включаючи змазування і заміну обертових деталей, допомагають підтримувати їх оптимальну продуктивність.

Заходи обслуговування, які допоможуть забезпечити ефективну роботу насосів:

- *Регулярна перевірка та обслуговування.*

Проведення регулярних інспекцій та технічне обслуговування насосів відповідно до рекомендацій виробника. Це включає зміну мастила, перевірку стану ущільнювачів, обгонних коліс і інших деталей.

- *Моніторинг вібрації та температури.*

Встановлення систем моніторингу, які відстежують вібрацію та температуру насосів. Високі показники можуть свідчити про проблеми, такі як неспівпадіння чи знос деталей.

- *Забезпечення належного змащення.*

Проведення періодичного належного змащення. Змащення допомагає зменшити тертя та знос, покращуючи ефективність та тривалість служби насосів.

- *Правильне налаштування і керування.*

Використання належного налаштування та системи керування дозволяють регулювати швидкість та потужність насосів відповідно до змін потреб системи.

- *Зберігання чистоти робочого середовища.*

Уникання потрапляння забруднень чи агресивних речовин в насоси, для попередження зносу і пошкоджень.

- *Виправлення протікань і витоків.*

Протікання або витoki рідини потребують негайного виправлення, оскільки вони можуть призвести до втрати продуктивності та витрат енергії.

- *Навчання персоналу.*

Забезпечення належного навчання та підготовки персоналу, які відповідають за обслуговування та експлуатацію насосів, а також розуміння принципів роботи допомагає вчасно виявляти та усувати проблеми.

- *Заміна старих або неефективних насосів.*

При необхідності розглядається можливість заміни застарілих або неефективних насосів на сучасні, більш потужні та енергоефективні моделі.

Підтримка оптимальної продуктивності насосів вимагає систематичної уваги до їх обслуговування та моніторингу. Такий підхід допомагає зберігати високу ефективність та тривалість служби обладнання.

3.5. Моніторинг та автоматизація насосного обладнання.

Використання систем моніторингу та керування дозволяє реагувати на зміни у вимогах і регулювати насоси для оптимальної продуктивності та ефективності. Використання систем моніторингу та керування в електроприводах насосів є важливим для оптимізації роботи насосних систем і підвищення ефективності. Такі системи дозволяють здійснювати реальний час спостереження і керування параметрами роботи насосів.

Переваги використання систем моніторингу та керування в електроприводах насосів:

- *Оптимізація робочого режиму.*

Системи моніторингу здатні вимірювати параметри, такі як тиск, температура, рівень рідини і потужність. Ця інформація дозволяє в режимі реального часу оптимізувати робочий режим насосів для підтримки необхідних параметрів.

- *Реагування на зміни в системі.*

Системи моніторингу можуть автоматично реагувати на зміни в системі, наприклад, збільшуючи чи зменшуючи потужність насосів відповідно до потреби, що зменшує споживання енергії та запобігає перевантаженням.

- *Діагностика та прогнозування поломок.*

Системи моніторингу вимірюють різні параметри, що дозволяє виявляти аномалії та реєструвати ознаки можливих поломок насосів. Це допомагає запобігати аваріям та забезпечує своєчасне обслуговування.

- *Зменшення споживання енергії.*

Системи керування дозволяють регулювати швидкість та потужність насосів відповідно до реальних потреб, що допомагає знизити споживання енергії та витрати насосних систем.

- *Вдала інтеграція з іншими системами.*

Системи моніторингу та керування можуть бути інтегровані з іншими системами автоматизації, що спрощує керування всією системою та дозволяє автоматично оптимізувати роботу насосів.

- *Збільшення надійності та тривалості служби.*

Вчасний моніторинг та керування дозволяють збільшити тривалість служби насосів і зменшити ризик непередбачених поломок.

Використання систем моніторингу та керування допомагає підвищити ефективність та надійність насосних систем, зменшити витрати на енергію та обслуговування, а також спростити управління всією системою.

3.6. Використання ефективних матеріалів.

Вибір високоефективних матеріалів для насосних систем може підвищити їх тривалість служби та зменшити витрати енергії. Правильний вибір матеріалів може допомогти зменшити тертя, знос, корозію та теплові втрати.

Матеріали, які можуть бути використані для підвищення енергоефективності насосних систем:

- Нержавіюча сталь (наприклад, 304 або 316L). Нержавіюча сталь добре витримує корозію, що особливо важливо для насосів, які перекачують агресивні рідини чи працюють у корозійних середовищах.

- Кераміка. Керамічні обгонні колеса та ущільнення можуть зменшити тертя і знос, що допомагає збільшити тривалість служби насосів та знизити втрати енергії.
- Карбід кремнію (SiC). Карбід кремнію є ефективним матеріалом для виробництва ущільнень та обгонних коліс, оскільки він має високу стійкість до тертя і корозії.
- Титан. Титан має високу міцність та корозійну стійкість і може бути використаний у насосах, які перекачують агресивні рідини або працюють в агресивних середовищах.
- Термопластики. Деякі термопластики, такі як поліпропілен (PP) чи полівінілхлорид (PVC), можуть бути використані для внутрішніх деталей насосів і рідинопроводів, оскільки вони мають високу хімічну стійкість і легкість.
- Резина. Деякі види резини можуть бути використані для виготовлення ущільнень та вкладишів в насосах.
- Високоєфективні ізоляційні матеріали. Використання високоєфективних ізоляційних матеріалів для утеплення трубопроводів та обгонних коліс допомагає зменшити теплові втрати.

3.7. Водовідновлення систем.

Використання систем для збору та використання стокових вод може зменшити споживання прісної води і витрати енергії на очищення води.

Запровадження цих заходів допоможе значно зменшити витрати на енергію та вплив на довкілля, забезпечуючи більш сталу та економічно вигідну роботу насосних систем.

3.8. Заміна енергоємного насосного обладнання

Режим роботи насосної установки нерозривно пов'язаний із способом функціонування системи перевезення рідини в цілому. Однією з ключових причин неекономічного функціонування насосної установки є невідповідність параметрів насоса (напору та подачі) вимогам системи. У певних ситуаціях можуть виникати не лише неефективні режими роботи, але й потенційно небезпечні для насосів та трубопроводів. Для досягнення оптимальних та безпечних робочих режимів насосних установок передусім необхідно коректно підібрати склад обладнання, визначити найбільш ефективні комбінації різних типів насосів, уникнути відхилень у параметрах насосної установки та системи завдяки вибору насосних роторів різних розмірів та частоти обертання.

Вибір насоса залежить від різноманітних факторів, таких як призначення насоса, конфігурація насосної системи, обсяг надходження та споживання рідини, характеристики гідравлічних параметрів системи, вид транспортованої рідини, умови експлуатації насосних агрегатів і інші.

Зазвичай насос слід використовуватися відповідно до умов, на які він розрахований. Іншими словами, він повинен перекачувати рідини, для яких він призначений. В протилежному випадку насоси працюють у неоптимальному режимі та можуть вийти з ладу надто рано.

Однією з обов'язкових умов є експлуатація насосів в режимах, які відповідають їх стандартним характеристикам. Відступання в робочих параметрах насоса від зазначених стандартів призводять до зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД) та зайвого витрати електроенергії.

При виборі насоса важливо враховувати можливі зміни в гідравлічній схемі насосної установки, оскільки це може впливати на умови роботи насосних агрегатів. Наприклад, при паралельному з'єднанні насосів зміна кількості активних насосів або режиму роботи одного з них впливає на

навантаження інших. У певних умовах такі зміни можуть призвести до неоптимальних або недопустимих робочих умов для насосних агрегатів.

Паралельна робота кількох трубопроводів знижує загальний гідравлічний опір системи і призводить до збільшення подачі насосів, тоді як послідовна робота підвищує опір і призводить до збільшення напору та зменшення подачі. Таким чином, вибір типу та моделі насосів повинен враховувати можливі зміни в гідравлічній схемі насосної установки і системи в цілому.

Також на вибір насосів впливають коливання рівня або тиску на вході до насосів. Особливу увагу слід приділити підтримці безкавітаційного режиму роботи насосів. Для досягнення цього режиму необхідно, щоб тиск на вході до насоса перевищував критичний рівень, який визначається тиском насичених парів перекачуваної рідини.

Вирішальний вплив на робочий режим насоса мають гідравлічні параметри системи. Оптимальна взаємодія між насосною установкою і мережею трубопроводів можлива, коли подача насоса відповідає розходу в мережі, і підтримуваний напір відповідає втратам напору в системі та статичній висоті підняття рідини. Неспівпадіння параметрів насоса і системи трубопроводів, а також вибір насосів з "запасом" за напором і витратою без вжиття спеціальних заходів, призводять до виникнення перевантаження, кавітації, помпажу та інших аномальних режимів.

Якщо розрахункові параметри не відповідають реальним, виникає ситуація, при якій неможливо забезпечити потрібний об'єм постачання води споживачеві, або подача відбувається зі збільшеним використанням енергії.

При виборі насосів необхідно також враховувати характеристики рідини, яку потрібно перекачувати, з основним урахуванням її в'язкості.

При обговоренні питання щодо модернізації застарілого насосного обладнання, рекомендується віддавати перевагу насосному обладнанню від датської компанії Grundfos, яке вже визнане як оптимальне в Європі з точки зору його характеристик.

3.9. Впровадження частотно-регульованого електроприводу двигунів насосів

Традиційна схема для постачання холодної води зазвичай виглядає наступним чином:

На першому етапі, насосна станція розміщена в водоймищі і перекачує воду до резервуара на станції водоочистки. Ця станція водопідготовки іноді розташована на відстані декількох десятків кілометрів від самого водоймища. Тут вода проходить повний цикл очищення.

Після очищення вода подається на другий етап, де насосна станція другого підйому перекачує її через водопровідну мережу безпосередньо до кінцевих споживачів або до резервуара, який зазвичай розміщений на висоті, що вище рівня місцевого забору води. Звідси вода постачається до споживачів вже за допомогою гравітації.

На кожній із цих станцій, зазвичай, встановлюється декілька насосів, включаючи резервні, щоб забезпечити неперервне водопостачання. Ці насоси оснащені двигунами потужністю кілька кіловатт. Споживання води характеризується чітко вираженими добовими та тижневими циклами, тому необхідне регулювання подачі води відповідно до обсягу її використання.

Мережа водопроводу відзначається великим розгалуженням і значною протяжністю, тому споживачі, що розташовані на великій відстані і на високих висотах порівняно з насосною станцією другого підйому, часто стикаються з недостатнім тиском води. В таких випадках застосовують підкачуючі насосні станції, призначені для обслуговування групи будівель, які піднімають тиск в мережі до необхідного рівня. Ці станції не потребують постійного обслуговуючого персоналу, і тиск на виході регулюється періодично за допомогою засувки. Однак вночі, через зниження витрат води, тиск в водопровідній мережі може зростати до неприпустимих значень, а в пікові години споживання (ранок і вечір) - падати до надто низького рівня.

Для досягнення потрібного режиму роботи насосних станцій при зміні умов необхідно виконувати регулювання в двох напрямках: насамперед, регулювання гідравлічних параметрів роботи насосів, і вдруге, регулювання енергоефективності роботи обладнання насосної станції.

Для насосних установок відцентрового типу існують різні методи регулювання подачі рідини і тиску, включаючи такі:

1. Дроселювання трубопроводу. Зменшення діаметру трубопроводу для обмеження потоку рідини та підвищення тиску.
2. Перепуск частини потоку рідини з вихідного патрубка насоса у вхідний. Частина рідини відводиться з вихідного патрубка насоса і повертається на вхід, змінюючи тиск і подачу.
3. Відключення або підключення насосів (ступінчасте регулювання). Здійснюється шляхом включення або відключення насосів з метою регулювання обсягу перекачування.
4. Зміна частоти обертання робочого колеса насоса. Зміна швидкості обертання насосного обладнання для досягнення бажаного рівня подачі і тиску.

Кожен із цих методів регулювання може бути використаний залежно від конкретних умов та вимог для системи насосного обладнання.

Дроселювання трубопроводу є дуже поширеним методом регулювання тиску і подачі рідини в системах насосного обладнання. Цей метод використовує механічний регулюючий пристрій, такий як шибер, дросель-клапан, засувка, діафрагма тощо, розташований на напірному патрубку насоса. Цей пристрій, зміщуючись, змінює поперечний перетин трубопроводу [5], і це дозволяє регулювати тиск і обсяг перекачуваної рідини в системі.

Попри свою простоту, цей метод регулювання має кілька недоліків. Один із них - зниження ККД (коефіцієнта корисної дії) насосної станції, особливо при глибокому регулюванні подачі. Це пояснюється тим, що енергія, витрачена на подолання додаткового опору регулюючого пристрою,

перетворюється на теплові втрати, що знижує енергоефективність цього підходу. Крім того, зі збільшенням тиску на виході насоса при закритті дроселюючого пристрою виникає ризик скорочення терміну служби ущільнень і ущільнювальних пристроїв, а також збільшення витоків рідини через стики і щілини. Іншим недоліком цього методу є можливість лише однозонного регулювання, зокрема зменшення подачі або тиску насосної установки.

Метод регулювання натиску за допомогою перепуску передбачає відведення частини рідини з виходу насоса на його вхід через засувку. Проте цей метод має свої недоліки. Енергія, витрачена на циркуляцію рідини в пусту, не перетворюється на корисну роботу, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) установки, особливо при глибокому регулюванні. Також, подача насосної установки регулюється лише в напрямку зменшення.

Регулювання подачі насосної станції за допомогою ступінчастого підключення або відключення насосів є простим методом управління, оскільки не потребує використання додаткового обладнання для регулювання. Однак він не забезпечує надійної підтримки сталого тиску при зміні витрати рідини, і може призводити до частого включення та вимикання насосів, що скорочує ресурс роботи обладнання. Для згладжування коливань подачі рідини і підтримання сталого тиску може бути необхідне будівництво додаткового резервуару. Крім того, такий метод може приводити до неоптимального режиму роботи електроприводів, що впливає на загальний ККД насосної станції.

Ці обставини призводять до скорочення надійності насосних станцій, на яких використовуються методи регулювання, описані раніше.

Зміна частоти обертання робочого колеса насосної установки дозволяє здійснювати неперервне регулювання продуктивності насосної станції з меншими витратами енергії, порівняно з попередніми методами. Проте цей підхід потребує значних інвестицій в регулююче обладнання, особливо для

потужних насосних установок, і може призвести до погіршення електромагнітної сумісності з електромережею. Зниження вартості регульованих електроприводів робить цей метод найбільш перспективним і ефективним з економічної точки зору.

Також можливе комбінування декількох методів регулювання. Один із широко використовуваних підходів полягає в поєднанні ступінчастого регулювання і зміни частоти обертання робочого колеса насосної установки, що досягається за допомогою частотно-регульованого електроприводу.

Згідно рекомендацій [2], регульований електропривід слід встановлювати на один із насосних агрегатів у групі, де працюють 2-3 робочих агрегати. Це дозволяє досягти оптимального режиму роботи насосів щодо енергоспоживання при спільній роботі. Такий підхід спрямований на підвищення енергетичної ефективності обладнання насосних станцій.

У сучасний час, оптимальним рішенням для вирішення проблем у системах водопостачання є використання частотно-регульованого асинхронного електроприводу. Для демонстрації економічної ефективності частотного регулювання насосів порівняно з дросельним регулюванням, в таблиці 3.1 [1] представлені результати обчислень споживання електроенергії насосом з номінальною подачею води 180 м³ і номінальним тиском 40 м за різних режимів витрати води.

У таблиці 3.1 наведені кінцеві показники електроенергії, і їх порівняння демонструє, що перехід до частотного регулювання призводить до економії електроенергії на рівні близько 63%.

Таблиця 3.1. Порівняння способів регулювання насосів.

Подача води, м ³ /г	Тривалість роботи насосів, г	Спосіб регулювання насосів							
		частотний				дросельний			
		Тиск стовпа води, м	Потужність насосів, кВт	ККД, %	Витрати електроенергії, кВт.г	Тиск стовпа води, м	Потужність насосів, кВт	ККД, %	Витрати електроенергії, кВт.г
180,0	500,0	40,0	23,40	84,0	11700,0	40,0	23,40	84,0	11700,0
150,0	1000,0	30,80	15,20	83,0	152000,0	45,0	22,70	81,0	22700,0
120,0	2500,0	22,40	8,90	82,0	22300,0	49,0	21,950	73,0	54900,0
90,0	2500,0	16,00	4,80	81,0	12100,0	53,0	21,30	61,0	53300,0
60,0	1000,0	11,20	2,50	74,0	2500,0	57,0	21,70	43,0	21700,0
30,0	500,0	8,80	1,40	51,0	700,0	60,0	18,20	27,0	9100,0
Всього за рік	8000,0				64500,0				173400,0

Перехід на частотне керування електроприводами має наступні переваги:

1. Здатність до плавного і безперервного регулювання швидкості робочих двигунів насосів у всьому діапазоні, що дозволяє підтримувати оптимальний тиск води на мінімально необхідному рівні.
2. Контрольоване плавне прискорення і зупинка робочих двигунів, що суттєво підвищує надійність механічного та електричного обладнання і збільшує строк служби.
3. Підвищення коефіцієнта потужності завдяки тому, що пристрій для зміни частоти практично не вимагає реактивної енергії.
4. Заощадження електроенергії, пов'язане з переходом до енергоефективного управління, і відмовою від регулювання тиску води шляхом використання дроселів.
5. Розширені можливості програмного налаштування параметрів електроприводу, контролю роботи та діагностики несправностей.

Встановлення пристрою м'якого пуску надає наступні переваги:

- Зменшення гідроударів у водопровідній мережі та відсутність значних пускових струмів завдяки плавному та контрольованому запуску електродвигунів.
- Забезпечення контролю та діагностики роботи насосного агрегату під час його роботи з використанням пристрою м'якого пуску.

3.10. Комп'ютеризація технологічних процесів насосних станцій

Згідно сучасних стандартів, насосні станції будь-якого призначення мають бути розроблені з можливістю автоматичного управління, що реагує на технологічні параметри, такі як рівень води в ємностях, тиск або витрати води в мережі. Також передбачається можливість дистанційного (телемеханічного) керування з пункту керування. Навіть локальне управління, яке здійснюється персоналом, що приходить періодично, повинно передавати необхідні сигнали на пункт керування або на пункт з постійною присутністю обслуговуючого персоналу.

Системи керування регульованими електроприводами передбачають автоматичне регулювання на основі вимірів тиску в конкретних мережних вузлах, витрати води, яка постачається в мережу, і рівня води в резервуарах.

У сучасних насосних станціях важливо забезпечити постійне моніторингове вимірювання параметрів, таких як тиск у напірних водоводах та при кожному насосному агрегаті, витрати води на напірних водоводах, а також контроль рівня води в дренажних прямках та вакуум-котлах, температури підшипників агрегатів (якщо необхідно), і виявлення аварійного рівня затоплення, коли вода наближається до рівня фундаментів електроприводів. У випадку, коли потужність насосного агрегату становить 100 кВт або більше, необхідно проводити періодичний розрахунок коефіцієнта корисної дії (ККД) з точністю не гірше 3%.

При автоматизованому або дистанційному (телемеханічному) управлінні, також має бути врахована можливість місцевого управління.

У системах насосних станцій потрібно передбачити автоматизацію додаткових процесів, таких як автоматична промивка обертаючихся сіток згідно з попередньо встановленою програмою, яка регулюється за часом або за рівнями, відкачування дренажних вод у відповідності до рівня води у приямках, електричне опалення в залежності від температури повітря в приміщенні, а також систему вентиляції.

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) для водопостачання представляє собою набір технічних, інформаційних, математичних та програмних засобів, призначених для розробки та реалізації керуючих впливів на систему постачання води. Основним критерієм є забезпечення мінімальних витрат на воду, яка подається споживачам, при збереженні необхідної якості цієї води. АСУТП водопостачання має ієрархічну структуру і включає в свій склад наступні основні підсистеми:

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) включає наступні складові:

- Управління підняттям води, включаючи керування групами артезіанських свердловин і першого підйому води;
- Управління процесом очищення води, включаючи контроль над роботою водоочисних споруд;
- Управління процесом подачі і розподілу води, включаючи керування насосними станціями, які постачають воду в мережу;
- Управління далеким транспортом води, включаючи управління насосними станціями магістральних трубопроводів.

Однією з складових модернізації електрообладнання насосної станції є наступне:

- Встановлення програмованого контролера для регулювання тиску та подачі води, керування електрообладнанням насосної станції, автоматизації її функціонування та моніторингу стану електрообладнання.
- Модернізація пульта управління та системи сигналізації.

Встановлення програмованого контролера забезпечує наступні можливості:

- Перехід від використання релейно-контакторної схеми управління, що підвищує надійність системи;
- Розширення функціональності та гнучкості управління, включаючи можливість програмного налаштування алгоритмів роботи, виконання складних функцій управління, таких як регулювання тиску або подачі насосів за індивідуальними налаштуваннями, програмоване зміна тиску протягом доби, автоматичне перемикання насосів тощо;
- Можливість проведення контролю та діагностики несправностей;
- Управління перетворювачем частоти та пристроєм м'якого пуску через послідовний інтерфейс, що забезпечує повний контроль за роботою силового електрообладнання.

Сигнали керування та вимірювальні дані з обладнання насосної станції збираються в шафі управління ШУ. Тут вони комбінуються в одну загальну інформаційну лінію зв'язку, яка підключається до технологічного контролера ТК.

Технологічний контролер виконує загальний алгоритм управління насосною станцією та забезпечує обмін інформацією з автоматизованою системою управління технологічним комплексом АСУ ТК. Програмне забезпечення ТК включає ряд функціональних модулів, які реалізовані на програмному рівні:

- Керування основною насосною установкою.
- Керування додатковою насосною установкою, такими як пожежні насоси.
- Керування системою дренажних насосів.
- Вимірювання та обробка параметрів обладнання насосної станції.
- Управління системою опалення та вентиляції приміщень насосної станції.

- Забезпечення функцій заборони несанкціонованого доступу до території насосної станції.
- Обслуговування місцевого терміналу.
- Передача інформації про параметри та режими роботи обладнання насосної станції до АСУ ТК та обробка сигналів управління, які надходять з АСУ ТК.

У цьому контексті, програмно-технічні комплекси (ПТК) системи автоматизованого управління насосною станцією водопостачання, разом із іншими технічними засобами, включаючи інші ПТК, мають сприяти таким аспектам:

- забезпеченню оптимального управління процесами подачі та розподілу води;
- підвищенню безпеки експлуатації автоматизованого обладнання насосної станції;
- ефективному керуванню параметрами автоматизованого устаткування;
- ефективному управлінню економічною ефективністю автоматизованого обладнання;
- підвищенню надійності функціонування автоматизованого устаткування;
- забезпеченню комфорту для операційного та обслуговуючого персоналу;
- наданню інформаційної підтримки для виробничо-технічної діяльності обслуговуючого персоналу;
- об'єктивній оцінці ефективності використання устаткування насосної станції та дій персоналу.

Програмно-технічний комплекс повинен мати здатність створювати як однорівневі, так і багаторівневі ієрархічні системи для розподіленого управління та централізованого контролю, які відповідають структурі технологічного об'єкту і методам його управління.

Технічні та програмні засоби програмно-технічного комплексу (ПТК) мають забезпечувати можливість створення автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП), які є відкритими для модернізації та розвитку без необхідності зміни раніше реалізованих технічних рішень. У функціональній структурі ПТК АСУ насосної станції з точки зору користувача можна виділити наступні функціональні підсистеми:

- Збір, первинна обробка і розподіл інформації, що надходить від датчиків теплотехнічних та електротехнічних параметрів у різних форматах, включаючи аналогові, цифрові та дискретні сигнали. Це також включає приймання та передачу інформації від інших ПТК АСУТП НС та формування поточних інформаційних масивів для подальшого використання іншими підсистемами.

- Відображення інформації та взаємодія користувачів з ПТК.
- Дистанційне управління виконавчими механізмами.
- Інформаційно-обчислювальна підсистема, яка реалізує алгоритми розрахункових операцій, накопичення та усереднення інформації, а також архівування.

- Система обміну інформацією між ПТК АСУТП НС.
- Автономний контроль і самодіагностика ПТК, а також підстроювання прикладних програм і наповнення інформаційної бази, збір та обробка технічних діагностичних даних ПТК (інструментальна підсистема).
- Реалізація алгоритмів сервісних функцій.

Система опису типових інформаційних завдань ПТК повинна включати наступні компоненти:

- Створення відеозаписів.
- Генерація різних видів звітної документації, такої як відомості та журнали.
- Формування та збереження архівних даних.

Для кодування технічного устаткування, технічних засобів ПТК та всієї системи АСУТП, будь то фізичні чи віртуальні автоматичні пристрої,

алгоритми і програми, слід використовувати єдину систему кодування, яка буде стандартною для всіх компонентів АСУТП та ПТК, включених до її складу.

Для полегшення сприйняття інформації, яка відображається на моніторах, екранах для спільного використання та принтерах, можна використовувати технічне термінологічне кодування з використанням загальноновживаних термінів і скорочень, які характерні для водопостачання.

Вимоги до програмного забезпечення визначаються на основі міжнародних і національних стандартів та спираються на такі ключові принципи:

1. Кожна складова ПЗ повинна бути побудована як окремий модуль, що спрощує розробку та обслуговування.
2. Саме програмне забезпечення і дані повинні мати ієрархічну структуру для зручності управління та доступу.
3. Розробка та обслуговування ПЗ повинні вимагати мінімальних ресурсів.
4. ПЗ повинно легко інтегруватися з іншими системами, а також бути розширюваним і модифікованим.
5. ПЗ має бути гнучким, щоб дозволяти внесення змін і налаштувань.
6. ПЗ повинно відповідати заданим алгоритмам, бути захищеним від помилкових дій, а також мати захист від несанкціонованого доступу та втрати даних.
7. ПЗ повинно продовжувати працювати в разі збоїв і відновлювати роботу після них.
8. Використання спільних рішень та підходів для спрощення розробки та підтримки.
9. Склад, структура та вихідні тексти програм повинні бути зрозумілими та наочними.

4 УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ

4.1. Тиристорний перетворювач напруги як засіб регулювання.

Тиристорний перетворювач напруги (ТПН) призначений для перетворення напруги, незмінної по амплітуді і частоті, в напругу, регульовану по амплітуді, а також для двофазного випрямлення напруги мережі живлення. Головним застосуванням ТПН є реалізація м'якого пуску асинхронних електродвигунів та динамічного гальмування, і, менше часто, для створення систем автоматичного регулювання швидкості..

Найпоширеніша схема реверсивного тиристорного перетворювача напруги представлена на зображенні 4.1. Для обертання двигуна в одному напрямку, подаються імпульси на тиристори $T1...T6$, а для обертання у протилежному напрямку - на тиристори $T5...T10$. У випадку електроприводів механізмів, які часто змінюють напрям обертання, можливе використання реверсивного контактора в статорному ланцюгу, замість додаткових груп тиристорів $T7...T10$, для здійснення зміни напрямку обертання асинхронного двигуна.

Принцип роботи ТПН заснований на регулюванні діючого значення першої гармоніки напруги U_s на статорі асинхронного двигуна за рахунок зміни кута регулювання відносно фазної напруги мережі живлення - так званого фазового управління, при якому до АД підводяться ділянки синусоїдальної напруги мережі. Введення в СІФУ напруги зміщення $U_{зм}$ задає кут регулювання, при якому забезпечується мінімальна вихідна напруга ТПН і відповідний момент торкання двигуна.

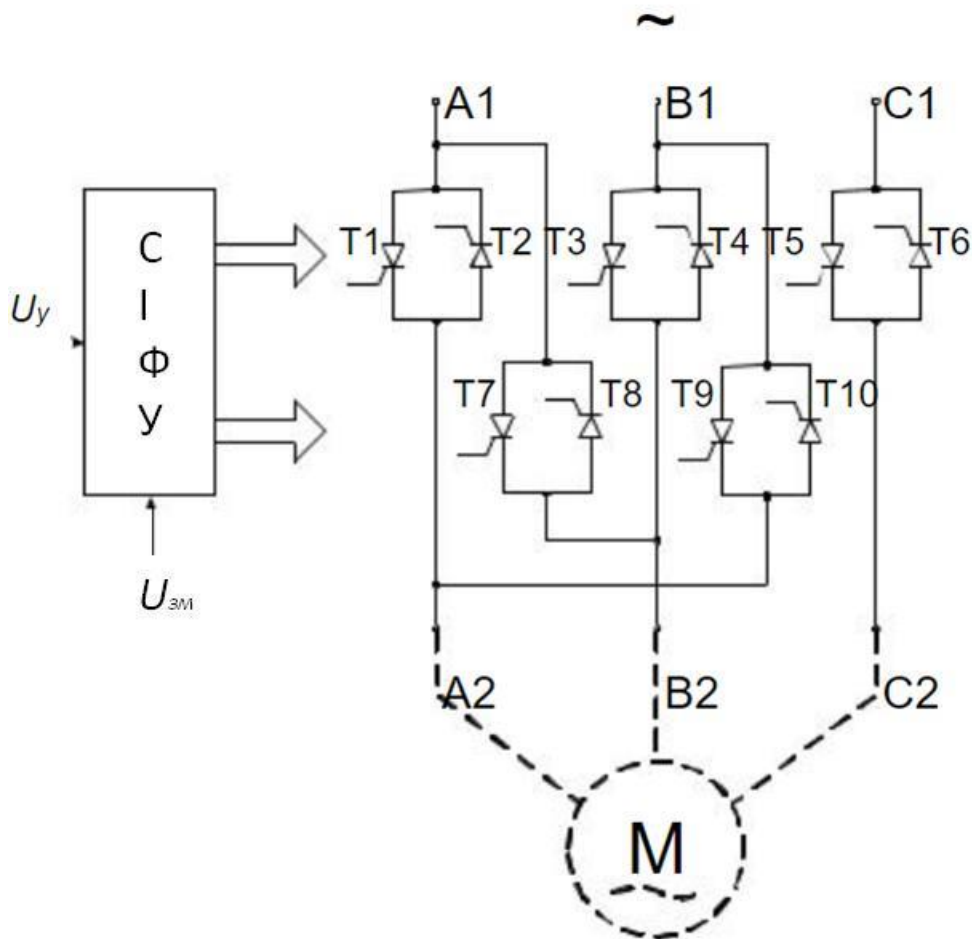


Рисунок 4.1- Силова схема реверсивного ТПН, яка живить асинхронний двигун.

Наявність активно-індуктивного навантаження, яким є і асинхронний двигун, забезпечує відставання по фазі струму від напруги на кут, що залежить від параметрів навантаження (АД). Такий струм протікатиме у двигуні та при живленні від ТПН, якщо забезпечити відкривання тиристорів точно в моменти часу, що відповідають t_{min} . При цьому кут провідності тиристорів максимальний і до двигуна підводиться напруга, максимальна за середнім значенням за півперіод $U_{Scp.max} / 2U_{C max}$.

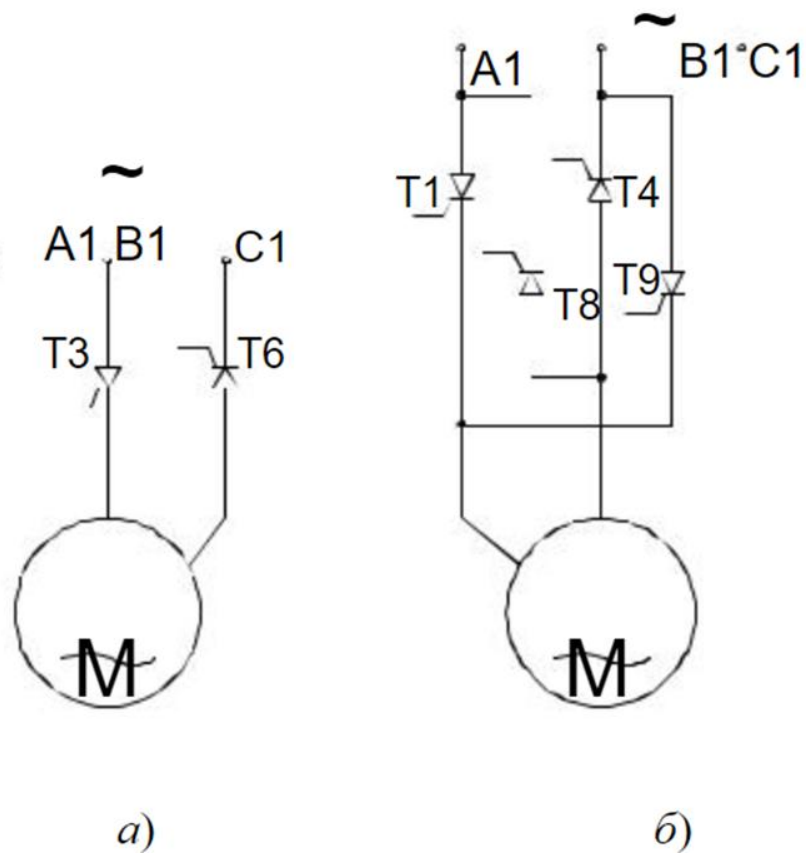


Рисунок 4.2 – Схеми реалізації динамічного гальмування при живленні від ТПН

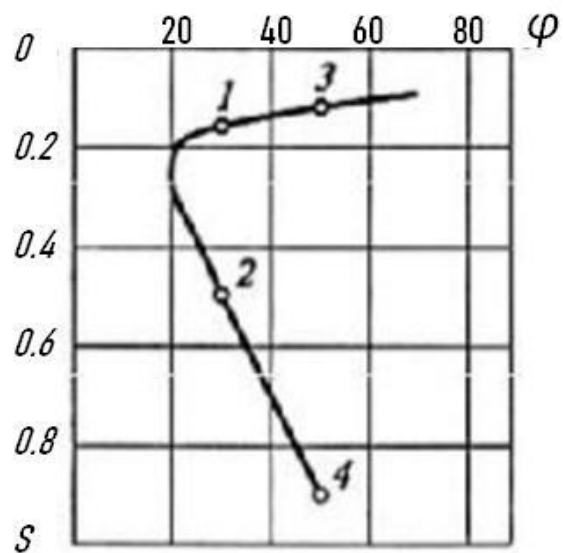


Рисунок 4.3 – Залежність кута навантаження φ від ковзання s .

4.2. Регулювання швидкості в розімкнутій системі «ТПН – АД»

Реалізується шляхом плавної зміни напруги керування U_y (рис.4.1) у певному діапазоні – є найпростішим способом виконання схеми плавного пуску АД. Можна показати, що зниження напруги U_s статора двигуна при незмінній його частоті f_s призводить до відповідного зниження магнітного потоку двигуна, що загрожує додатковим перегріванням двигуна через зростання споживаного струму.

До того ж, при використанні короткозамкнутого АД можливості регулювання швидкості при роботі в межах лінійних ділянок характеристик обмежені (рис.4.4 а) через те, що критичний момент двигуна пропорційний квадрату напруги, а критичне ковзання від нього не залежить. Регулювання швидкості в зоні k зазвичай пов'язане з протіканням в обмотках двигуна великих струмів, і тому не застосовується з енергетичних міркувань.

Найбільший практичний інтерес з точки зору збільшення діапазону регулювання швидкості становить випадок використання АД з фазним ротором, коли можна штучно пом'якшити характеристики за рахунок введення в ланцюг ротора додаткового реостату $R_{R.дод}$ (рис.4.4 б). Переривчасті лінії показують безліч точок, що відповідають роботі двигуна з фіксованими значеннями статора I_s . Як випливає з графіків, найбільш сприятливим умовам по нагріву двигуна відповідає навантаження з вентиляторним характером зміни моменту опору.

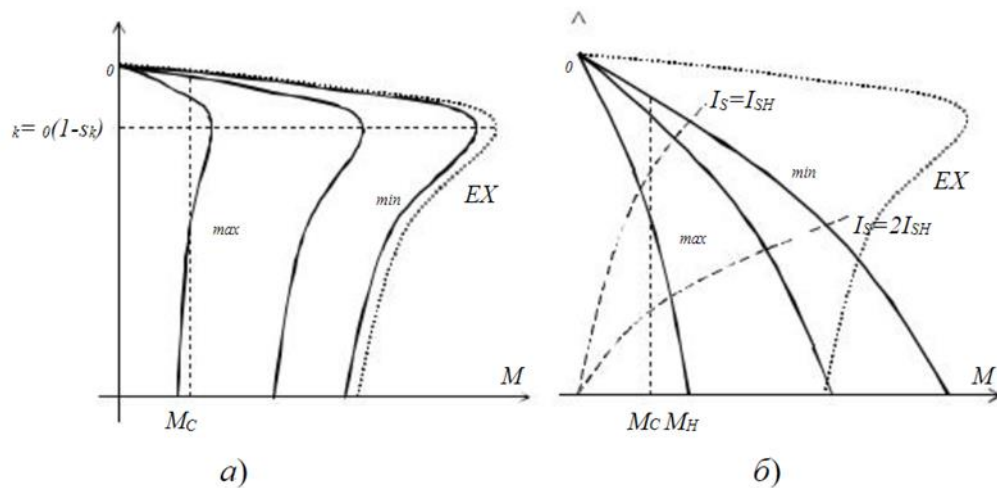


Рисунок 4.4. Механічні характеристики розімкненої системи ТПН-АД при $R_{R.dod} = 0$ (а) та $R_{R.dod} > 0$ (б).

Недоліками розімкнутої системи, крім малого діапазону регулювання швидкості, є також низькі енергетичні показники та мала жорсткість механічних характеристик.

4.3. Регулювання швидкості в замкнутій системі «ТПН – АД».

Підвищити жорсткість механічних характеристик, тобто добитися стійкої роботи (в тому числі і в зоні k) можна, якщо використовувати негативні зворотні зв'язки по напрузі статора АД, струму та швидкості. Зона регулювання швидкості k при цьому також є небажаною, тому використовують штучне пом'якшення характеристик за рахунок введення в ланцюг ротора додаткового реостату.

Розглянемо один з найбільш поширених варіантів системи з основним зворотним зв'язком за швидкістю та зі зворотним зв'язком з струмовою відсічкою (СВ) (рис.4.5).

На вході проміжного підсилювача РТ, що виконує функції П-регулятора струму, підсумовуються вихідні напруги регулятора швидкості РШ і негативної НС по струму з СВ. Вимірювання струму виконано за допомогою трансформаторів струму ТА1, ТА2 та ТА3, діодного мосту VD.

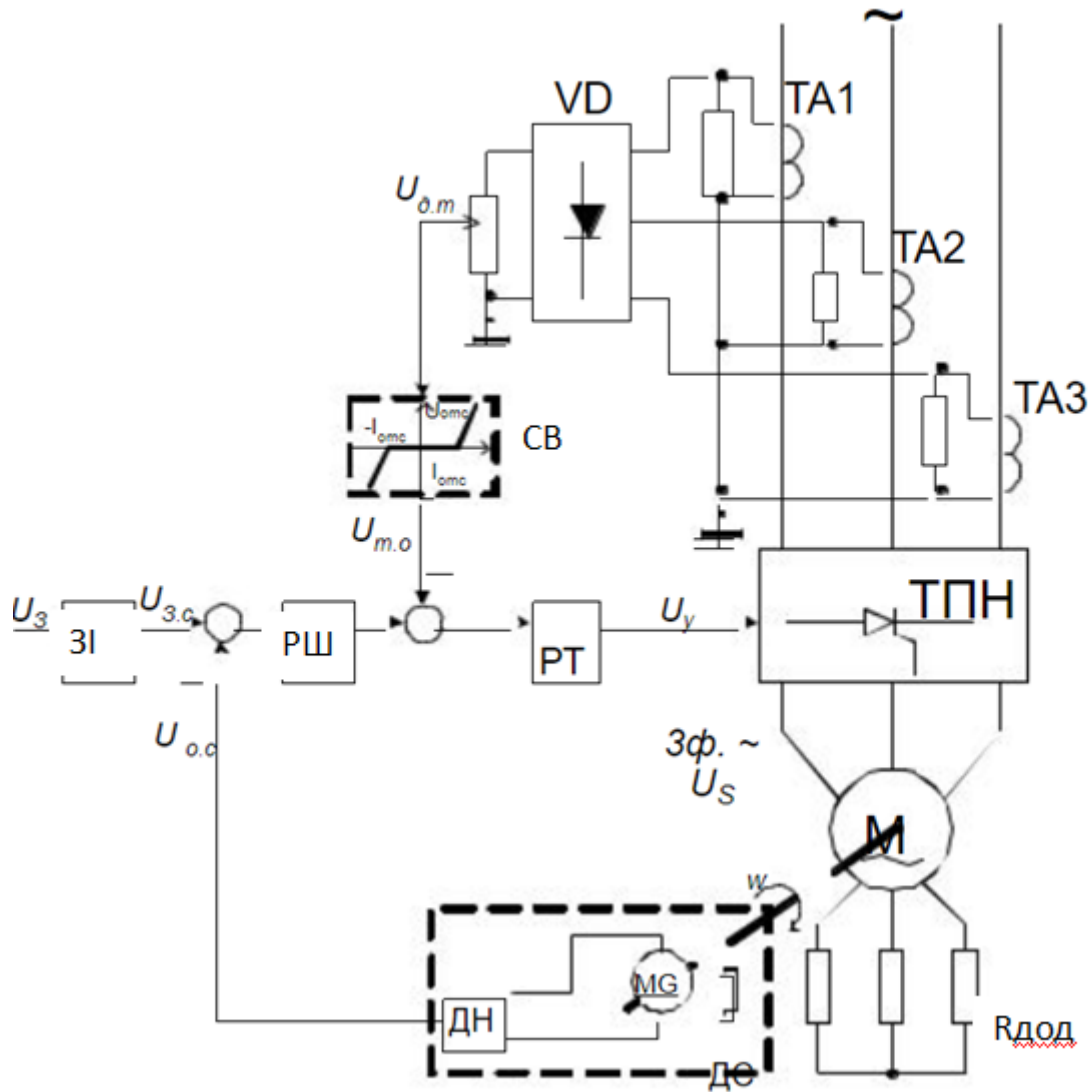


Рисунок 4.5. Функціональна схема замкненої системи «ТПН-АД»

Задля більш прийнятних динамічних властивостей системи рекомендують приймати $T_C=3-5T$.

Система володіє в цьому разі абсолютно жорсткими механічними характеристиками (рис.4.6). При введенні в РС лише пропорційної складової (П-РС) жорсткість показників буде кінцевою.

За відсутності додаткового реостату (рис.4.6б) тривалість роботи системи у зоні k має бути обмежена.

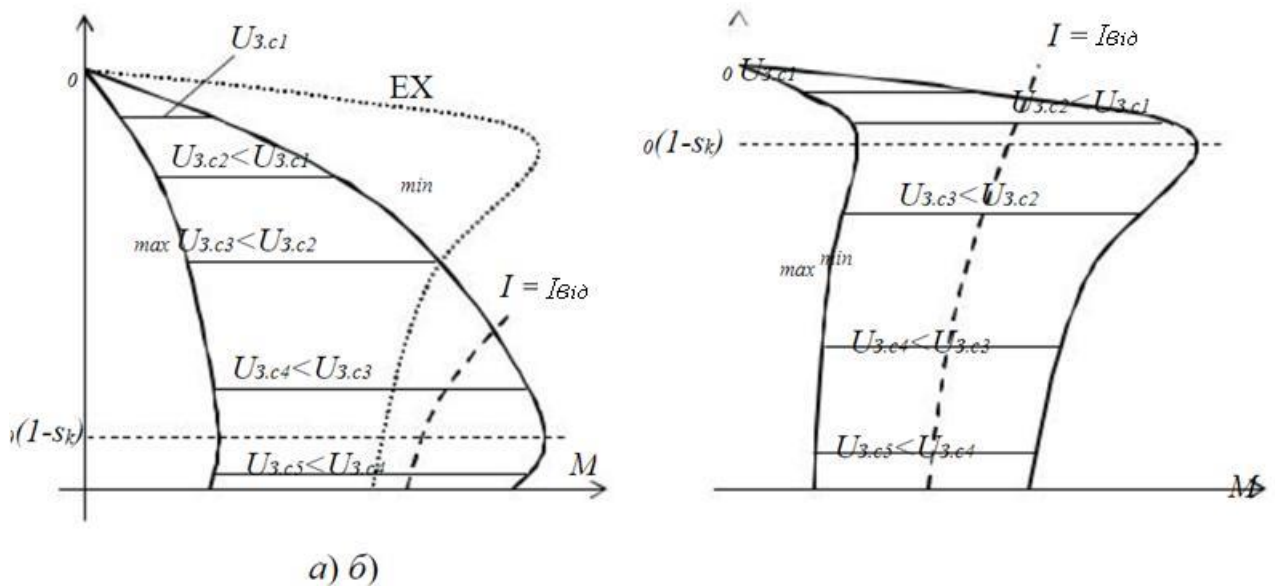


Рисунок 4.6. Механічні характеристики в замкненій системі системи ТПН-АД при $R_{R.dod} > 0$ (а) та $R_{R.dod} = 0$ (б).

4.4. Забезпечення режиму енергозбереження при недовантаженому електроприводі змінного струму на основі ТПН

Електроприводи змінного струму на основі тиристорних перетворювачів напруги дозволяють поряд із формуванням пускогальмівних режимів забезпечувати і режим енергозбереження при недовантаженому двигуні.

Проте, попри простоту силової схеми ТПН, у процесі функціонування таких систем виникають труднощі. Одна з них пов'язана з коливаннями моменту двигуна при роботі на підсинхронних швидкостях [5], коли і забезпечується ефект енергозбереження за рахунок зменшення напруги на двигуні при використанні ТПН з синхронізацією по напрузі в приводі без зворотного зв'язку по швидкості. У цьому випадку для стійкої роботи

необхідно застосовувати ТПН із синхронізацією струму [5,6]. Виникає завдання подання ТПН із синхронізацією струму у вигляді ланки системи автоматичного регулювання, що дозволяє підходити до проектування систем енергозберігаючого параметричного асинхронного електроприводу. Розглянемо підхід до вирішення такого завдання при роботі асинхронного двигуна на ділянці механічної характеристики ($0 < S < S_{\text{ном}}$), де власне і можлива реалізація ефекту енергозбереження у недовантаженого двигуна. При синхронізації системи імпульсно-фазового керування (СІФУ) ТПН по струму його вихідна напруга пов'язана з кутом керування і кутом навантаження

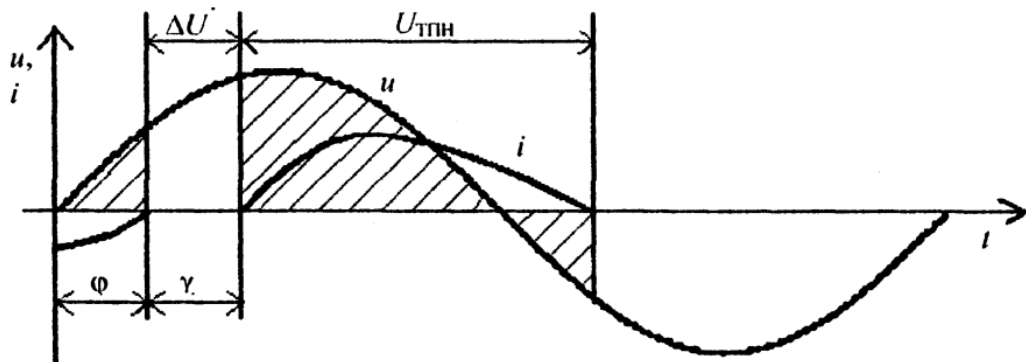


Рисунок 4.7 - Напруга і струм при керуванні тиристорами по куту γ .

В [5] для ТПН з синхронізацією по напрузі показано, що при безінерційній СІФУ затримка реакції ТПН на зміну сигналу управління та кута навантаження φ може бути прийнята однаковою і відображена в моделі поданням ТПН інерційною ланкою з постійної часу $T = 0,01$ с (при живленні від мережі з частотою 50 Гц), а для опису динаміки системи ТПН-АД можуть бути використані рівняння статички. Фізичні процеси, пов'язані з роботою АД при живленні від ТПН із синхронізацією за струмом і напругою, однакові, так як використовується одна і та ж силова схема (Рис.4.7), що формує на навантаженні діюче значення напруги, яке можна записати наступним чином:

$$U_{ТПН} = U_c - \Delta U \quad (4.1)$$

где U_m – напруга мережі; $\Delta U = f(\gamma + \varphi)$ – зміна напруги за рахунок ТПН як функція додавання кутів $(\gamma + \varphi)$.

Структурна схема системи приводу ТПН-АД із синхронізацією по струму ТПН та безінерційної СІФУ з урахуванням діючого значення напруги представлена на рис. 4.8.

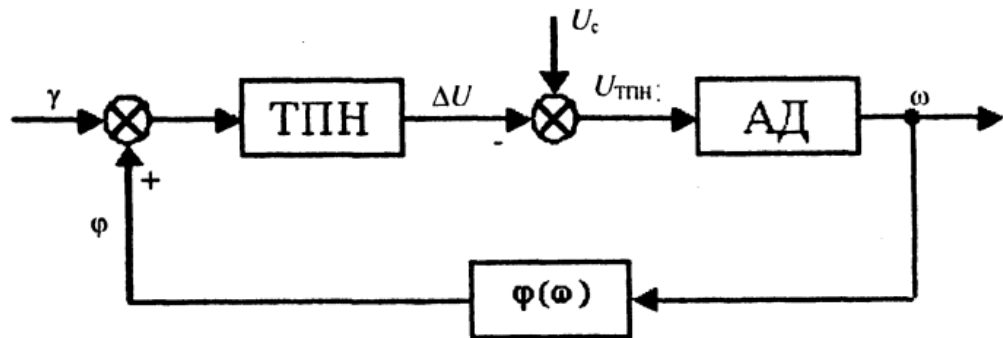


Рисунок 4.8 - Структурна схема системи приводу ТПН-АД із синхронізацією по струму ТПН та безінерційної СІФУ з урахуванням діючого значення напруги

Тут внутрішній позитивний зворотний зв'язок за кутом навантаження φ відображає вплив φ на формування вихідної напруги ТПН під час синхронізації його за струмом.

Залежність $\Delta U = f(\gamma + \varphi)$ можна визначити, якщо скористатися універсальними характеристиками $U_{ТПН} = f(\gamma, \varphi)$ [4]. На рис. 4.9 показано методику побудови залежності $U_{ТПН} = f(\gamma + \varphi)$ для силової схеми ТПН, що містить шість увімкнутих зустрічно-паралельно тиристорів, і за умови зміни ковзання в діапазоні $0 \leq S \leq S_{ном}$ (кут навантаження φ змінюється $\pi/2 \geq \varphi \geq \varphi_{ном}$).

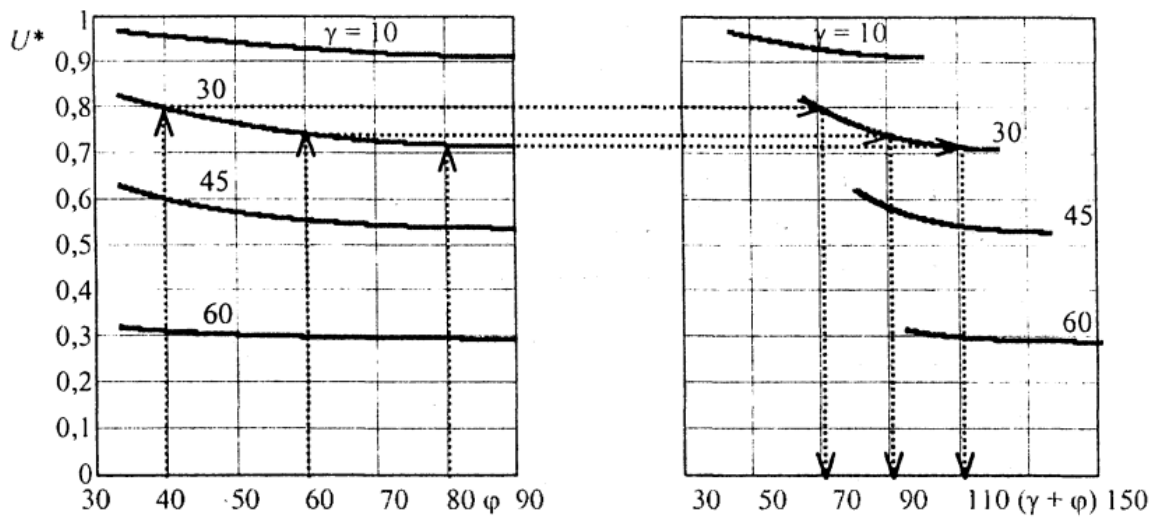


Рисунок 4.9 - Залежність $U_{ТПН} = f(\gamma + \varphi)$ для силової схеми ТПН, що містить шість увімкнутих зустрічно-паралельно тиристорів, і за умови зміни ковзання в діапазоні $0 \leq S \leq S_{\text{ном}}$ (кут навантаження φ змінюється $\pi/2 \geq \varphi \geq \varphi_{\text{ном}}$).

Використовуючі криві $U_{ТПН} = f(\gamma + \varphi)$, залежність $\Delta U = f(\gamma + \varphi)$ можна представити графічно (рис. 4.10).

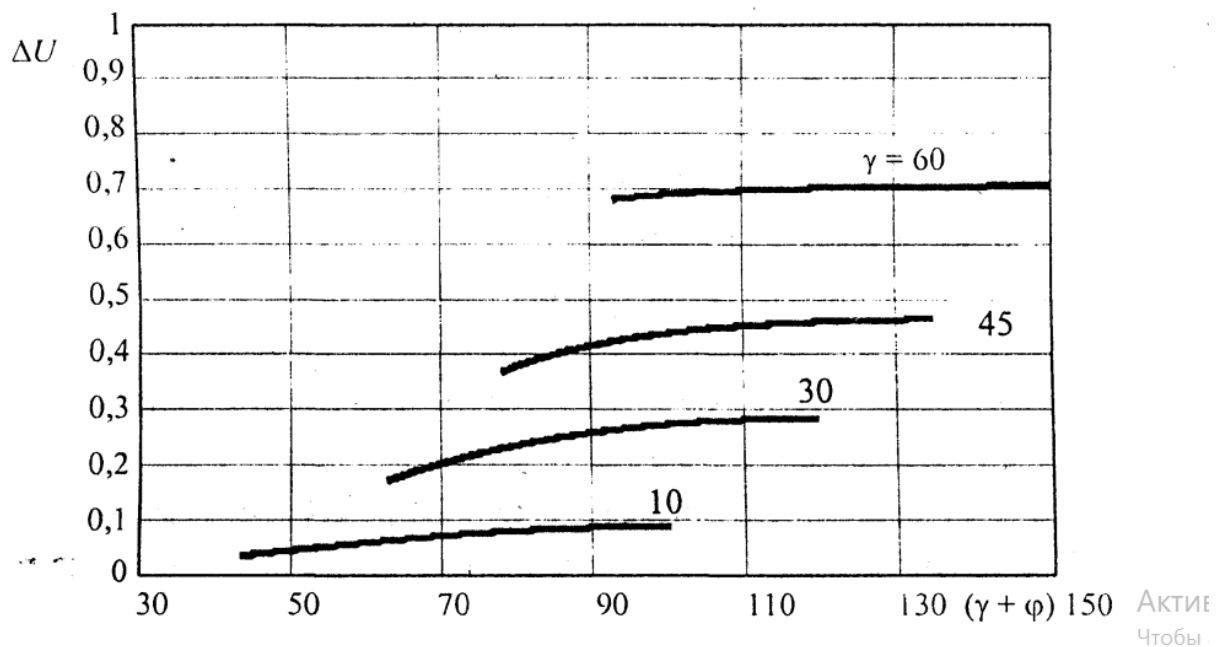


Рисунок 4.10 - Графічно представлена залежність $\Delta U = f(\gamma + \varphi)$

Напругу на виході ТПН із синхронізацією за струмом під час лінеаризації характеристики $\Delta U = f(\gamma + \varphi)$ у робочій точці представимо так

$$U_{ТПН} = U_c - k_1(\gamma + \varphi) \quad (4.2)$$

де k_1 - коефіцієнт, що дорівнює тангенсу кута нахилу дотичної до залежності $\Delta U = f(\gamma + \varphi)$, для заданих кутів керування γ і навантаження φ .

Наприклад, для АД типу 4А100L4 при $\varphi = \varphi_{ном}$ ($\varphi_{ном} = 35$ ел. град.) и $\gamma = 10$ ел. град, $k_1 = 0,083$.

З урахуванням викладеного структурну схему приводу ТПН-АД із синхронізацією за струмом можна подати у вигляді, зображеному на рис. 4.4.

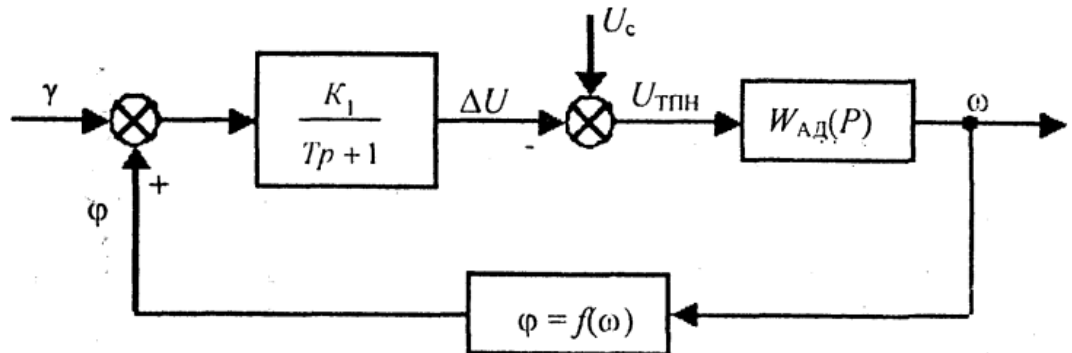


Рисунок 4.11 - Структурна схема приводу ТПН-АД із синхронізацією за струмом.

На цій схемі $W_{АД}(P)$ - передавальна функція асинхронного двигуна під час роботи його на лінійній ділянці механічної характеристики [5]. Для перевірки можливості подання ТПН із синхронізацією за струмом (рис. 4.11) було використано модель електропривода ТПН-АД (рис. 4.8), реалізовану в середовищі MATLAB 5.2 (рис. 4.12). Тут блок Subsystem реалізує (4.1)

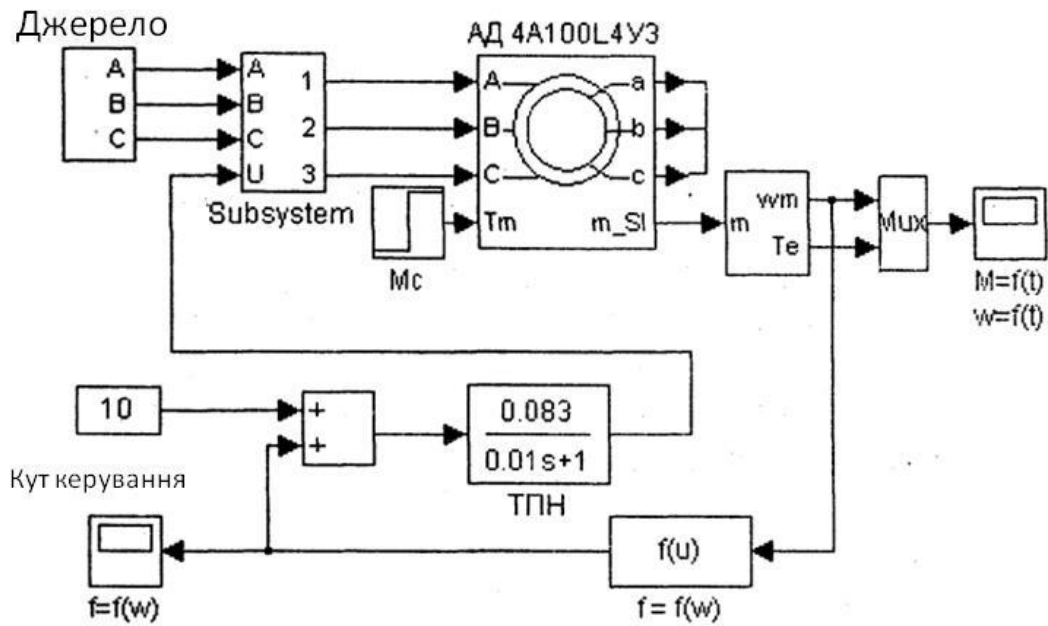


Рисунок 4.12. Модель електропривода ТПН-АД, де ТПН представлено аперіодичною ланкою, реалізована в середовищі MATLAB 5.2

Для аналізу та порівняння результатів моделювання розроблено повну модель системи ТПН-АД (рис. 4.13), складену також у середовищі MATLAB 5.2.

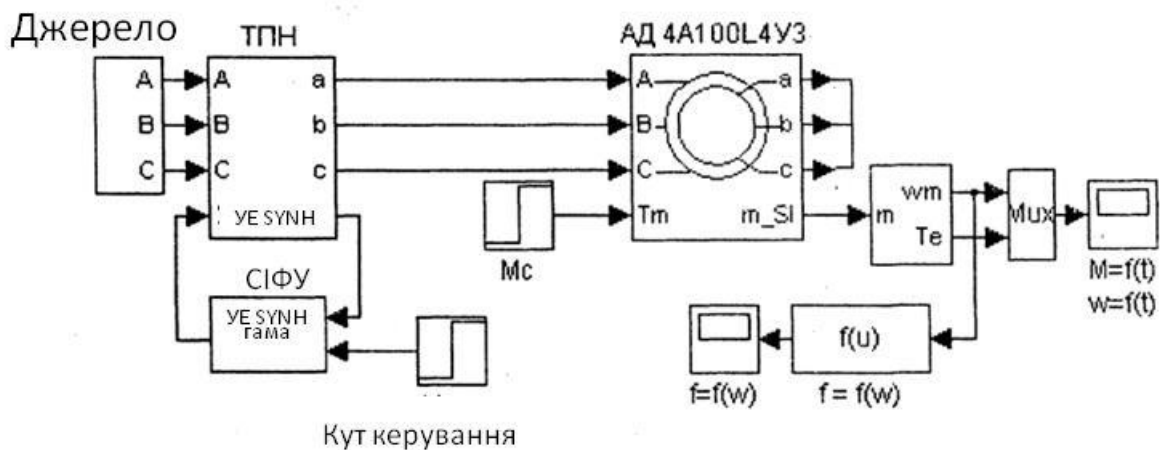


Рисунок 4.13. Повна модель системи ТПН-АД, реалізована в середовищі MATLAB 5.2

Тут ТПН і СІФУ представлені як підсистеми. На рис. 4.14 наведено блок-схему джерела і СІФУ, яка складається з пристроїв синхронізації, фазозсувного і розподільного пристроїв.

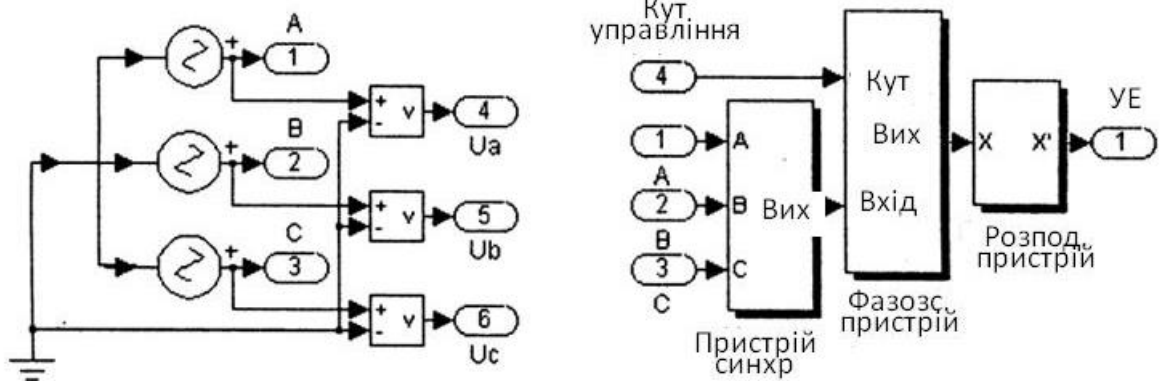


Рисунок 4.14. Блок-схему джерела і СІФУ, яка складається з пристроїв синхронізації, фазозсувного і розподільного пристроїв.

На рис. 4.15 наведено залежності кутової швидкості та моменту, що розвивається двигуном, у функції часу під час перехідного процесу скидання навантаження з $M_{\text{ном}}$ до $0,5 M_{\text{ном}}$ за умови кута керування тиристорами, що дорівнює 10 ел. град., розраховані за пропонованою моделлю, де ТПН представлено аперіодичною ланкою (рис. 4.12).

Аналогічні залежності, розраховані за повною моделлю (рис. 4.13), ілюструє рис. 4.16.

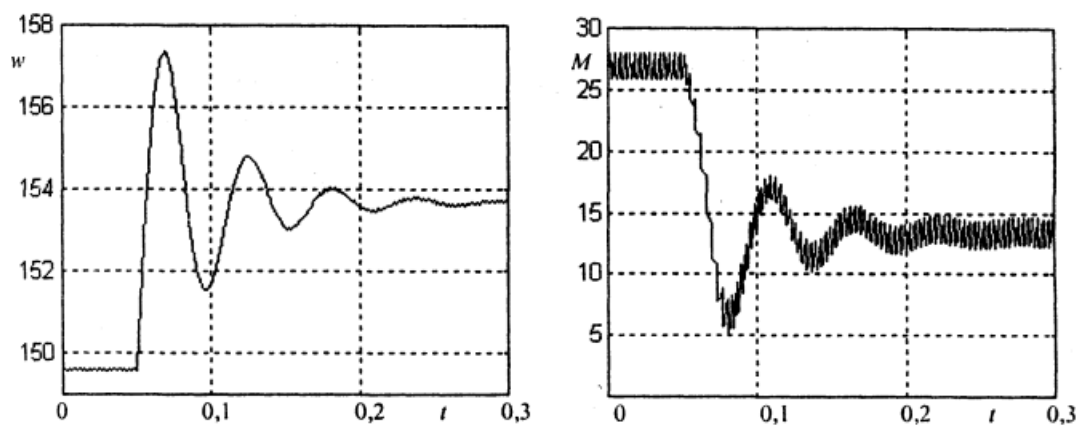


Рисунок 4.15. Залежності кутової швидкості та моменту, що розвивається двигуном, у функції часу під час перехідного процесу скидання навантаження з $M_{\text{ном}}$ до $0,5 M_{\text{ном}}$, де ТПН представлено аперіодичною ланкою.

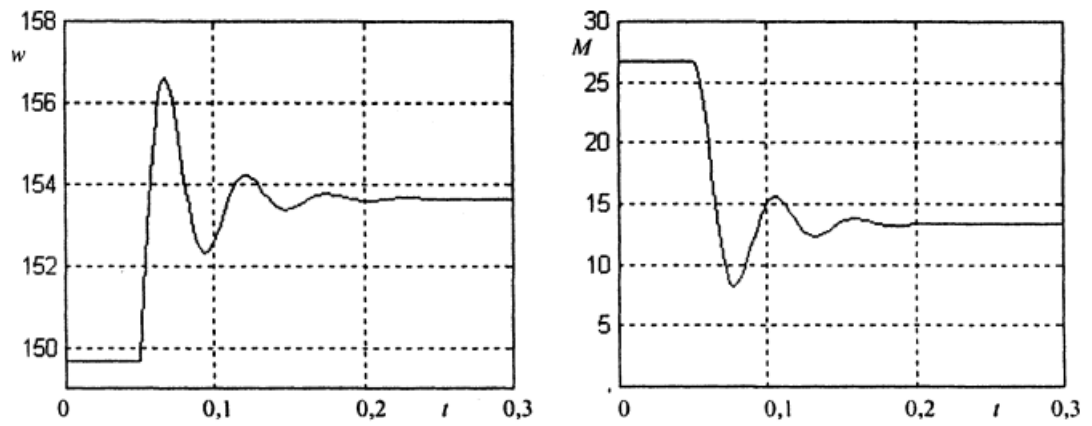


Рисунок 4.16. Залежності кутової швидкості та моменту, що розвивається двигуном, у функції часу під час перехідного процесу скидання навантаження з $M_{\text{ном}}$ до $0,5 M_{\text{ном}}$ для повної моделі

Порівняння перехідних процесів, розрахованих за повною моделлю і моделлю, де ТПН із синхронізацією за струмом представлений аперіодичною ланкою з коефіцієнтом передачі, визначеним на підставі статичних характеристик $\Delta U = f(\gamma + \varphi)$, показує досить гарний їхній збіг. На підставі цього можна зробити висновок, що дане уявлення ТПН може бути використане для аналізу та синтезу систем енергоощадного електроприводу, де, зокрема, не потрібне точне підтримання частоти обертання.

5 ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АГРЕГАТИВ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

5.1. Доцільність впровадження частотно-регульованого електроприводу в насосних установках.

Існуючі системи водопостачання із застосуванням неавтоматизованих електроприводів не досягають помітного зниження споживаної електроенергії при зменшенні витрати води. Замість цього, вони призводять до значного підвищення тиску в системі, що може спричиняти витoki води та негативно впливати на функціонування технологічного обладнання та водопостачальних мереж.

Здійснимо аналіз недоенергоєфективності та технологічних проблем, пов'язаних з використанням дросельного регулювання для регулювання подачі води насосами. На рисунку 5.1 наведені характеристики продуктивності відцентрового насоса при застосуванні дросельного та частотного регулювання. Крива 1 відображає роботу електроприводу без регулювання на номінальній частоті обертання, а крива 3 показує роботу системи при повністю відкритій заслінці. Значення витрати й напору води наведені на рисунку 5.1 у відносних одиницях, використовуючи номінальні витрату $Q_{\text{ном}}$ і номінальний напір $H_{\text{ном}}$ як базові параметри.

За номінальних параметрів, коли витрата і напір насоса відповідають точці А на графіку, споживана потужність насоса пропорційна площі прямокутника $OKAL$. При зменшенні витрат води електроприводі (на рисунку 5.1 зображена витрата води, що складає $0,6H_{\text{ном}}$) при використанні дросельного регулювання, що показане кривою 4 на рисунку 5.1, насос працює в точці В на кривій 1. Це призводить до зростання напору, що перевищує номінальний рівень, але потужність насоса, яка залежить від площі прямокутника $ODBF$, залишається відносно незмінною в порівнянні з потужністю, що споживається при номінальній витраті.

Таким чином, зменшення витрат води призводить до незначних або навіть непомітних змін в енергоспоживанні.

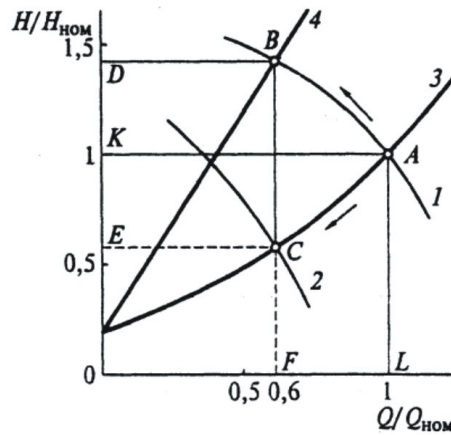


Рисунок 5.1 - Характеристики продуктивності відцентрового насосу при використанні дросельного та частотного регулювання.

Необхідно звернути увагу на той факт, що дросельне регулювання призводить до зростання тиску в системі при збільшенні витрати води, і це практично не допомагає зменшити споживання енергії. Також важливо враховувати значні втрати води в системі водопостачання, спричинені підвищенням тиску у системі через дросельне регулювання насосів. Ці обставини підкреслюють важливість впровадження енергозберігаючих технологій на насосних станціях.

Отже, ці фактори чітко демонструють, що потрібно перейти від системи дросельного регулювання насосів до систем автоматичного управління ними, використовуючи частотно-регульовані асинхронні електроприводи для автоматичного підтримування потрібних технологічних параметрів, зокрема, напору при змінній витраті води.

Можливості зменшення споживаної енергії при регулюванні швидкості електропривода в порівнянні з дросельним регулюванням можна бачити на рисунку 5.1. При зниженні швидкості насос працює в точці С на кривій 2 при незмінній характеристиці магістралі (крива 3), що призводить до істотного

зменшення споживаної енергії, як видно з площі прямокутника ОЕСФ. Це наглядно показує можливості значного зменшення енергоспоживання при використанні регульованих електроприводів насосів. При цьому також зменшується витрати води та напір у системі, що призводить до зменшення втрат (витоків) води.

Розглянемо методики для приблизеної порівняльної оцінки споживаної енергії під час зміни подачі відцентрових насосів за допомогою дросельного регулювання (ДР) та регулювання швидкості (ЧР) електродвигуна насоса.

Як було зазначено раніше, режим роботи насосної установки при постійній швидкості приводного електродвигуна визначається там, де характеристика насоса перетинається з характеристикою магістралі, яка підключена до насоса. Характеристика насоса визначає залежність напору (Н) від витрати (Q), яку можна подати у вигляді наступного виразу з високою точністю:

$$H = H_{0н} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - C Q^2, \quad (5.1)$$

де $\omega_{ном}$ $H_{0н}$ - напір насоса при $Q = 0$ і $\omega = \omega_{ном}$; $\omega_{ном}$ - номінальна швидкість асинхронного двигуна; C – конструктивний коефіцієнт насоса; $Q_{ном}$ і $H_{ном}$ - номінальні витрата і напір.

$$\omega = \omega_n = \frac{2\pi \cdot n}{60} \text{ рад/с} \quad (5.2)$$

$$C = \frac{(H_{0н} - H_{ном})}{Q_{ном}^2} \quad (5.3)$$

$$H = H_{0н} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q^2 \quad (5.4)$$

Характеристику магістральної лінії можна визначити наступним чином:

$$H = H_c + R \cdot Q^2, \quad (5.5)$$

де H_c – це статичний напір (протитиск), що відповідає $Q=0$ (зачиненій засувці); R – коефіцієнт опору магістральної лінії:

$$R = \frac{(H_{ном} - H_c)}{Q_{ном}^2} \quad (5.6)$$

На рисунку 5.2. представлені характеристики способів регулювання відцентрового насоса і магістралі.

Потужність, що споживана насосною установкою із мережі:

$$P_1 = P_{мех} / \eta_1, \quad (5.7)$$

де $P_{мех}$ - потужність на валу електродвигуна насоса; M_c - статичний момент навантаження на валу електродвигуна насоса; η_1 - ККД двигуна.

$$P_{мех} = M_c \cdot \omega \quad (5.8)$$

$$M_c = M_{ном} = P_n / \omega_n \quad (5.9)$$

Регулювання подачі через дросельну засувку ґрунтується на зміні опору магістралі. У такому випадку робоча точка механізму зсувається вздовж Q - H характеристики, яка відповідає номінальній швидкості двигуна, у напрямку зменшення подачі до того моменту, коли вона перетинається з новою характеристикою магістралі (відзначено точками 1, 2, 3 на рисунку 5.2).

При використанні електричного методу для регулювання подачі робоча точка залишається на незмінній характеристиці магістралі (відзначена точками 4, 5, 6, 7 на рисунку 5.2). Це означає, що зі зменшенням подачі також зменшується потрібний напір, що в свою чергу призводить до зниження статичної потужності, необхідної для роботи насоса при певній витраті води, порівняно з регулюванням через дросельну засувку.

Розглянемо ККД двигуна при різних методах регулювання подачі, не враховуючи втрат в сталі та втрат від холостого ходу. При частотному

регулюванні, де забезпечується стале значення ковзання, ККД розраховується як:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega} \cdot \frac{S_{\text{ном}}}{1 - S_{\text{ном}}} \cdot (1 + a)}, \quad (5.10)$$

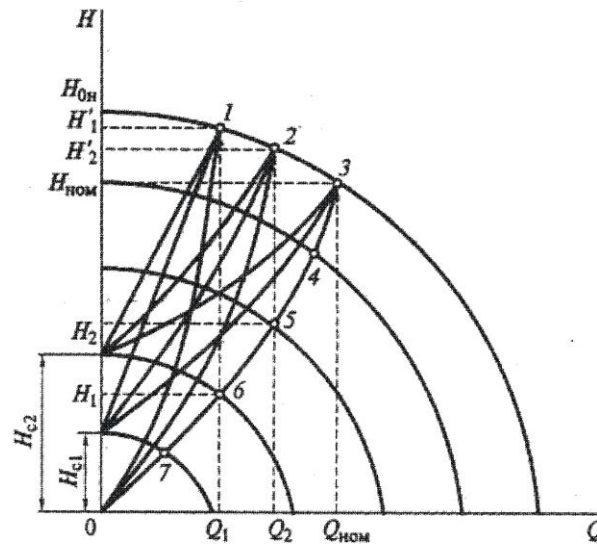


Рисунок 5.2 - Режимы регулювання відцентрового насосу:

- точки 1, 2, 3 представляють робочі режими при дросельному регулюванні подачі,
- точки 4, 5, 6, 7 відображають робочі режими при регулюванні подачі за допомогою зміни частоти обертання двигуна.

де $S_{\text{ном}}$ - номінальне ковзання електродвигуна; a - відношення активного опору фази статора R_1 і активного опору фази ротора R'_2 ,

$$a = \frac{R_1}{R_2},$$

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega} \cdot \frac{S_{\text{ном}}}{1 - S_{\text{ном}}} \cdot (1 + a)}$$

У випадку регулювання дросельною заслінкою, коли обертова швидкість (ω) дорівнює номінальній обертовій швидкості ($\omega_{\text{ном}}$) і є сталою,

ККД двигуна є постійним і може бути обчислений за допомогою наступної

$$\text{формули: } \eta_1 = \frac{(1 - s_{\text{ном}})}{(a \cdot s_{\text{ном}} + 1)} \quad (5.11)$$

Для отримання розрахункових виразів у вигляді функцій від витрати, можна виразити ковзання двигуна через витрату. Для цього у формулі змінюється $(\omega/\omega_{\text{ном}})^2$ на $[(1 - S)/(1 - S_{\text{ном}})]^2$ і, вирішується разом з виразом відносно S . В результаті одержимо:

$$S = 1 - (1 - S_{\text{ном}}) \sqrt{h_c + Q_*^2 (1 - h_c)} = 1 - (1 - S_{\text{ном}}) \cdot A, \quad (5.12)$$

$$\text{де } h_c = H_c / H_{0f}; \quad Q_* = Q_{fi}$$

$$A = \sqrt{h_c + Q_*^2 (1 - h_c)} \quad (5.13)$$

Залежність вираженого у нормованих одиницях моменту на валу турбомеханізму під час його роботи в мережі з постійними параметрами можна виразити таким чином:

$$\mu = \mu_{0c} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + (1 - \mu_{0c}) \cdot \frac{\omega}{\omega_n} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - h_c}{1 - h_c}}, \quad (5.14)$$

де μ — відносний момент на валу турбомеханізму, $\mu = M/M_{\text{сmax}}$ ($M_{\text{сmax}}$ — максимальний статичний момент на валу турбомеханізму при $\omega = \omega_{\text{ном}}$); M_{0c} — статичний момент на валу турбомеханізму (M_{0c}) при $Q_* = 0$ (закрити засувку), виражений у нормованих одиницях, $\mu = M_{0c}/M_{\text{сmax}}$.

Вирази (5.11) і (5.14) дають змогу виразити момент, ККД, швидкість та споживану з мережі потужність як функції від витрати води при встановленому тиску. Для зручності та універсальності використання цих розрахункових формул рекомендується виразити потужність в нормованих одиницях ($P_{*1} = P_1/P_6$), прийнявши за базове значення потужності P_6

максимальну статичну потужність на валу електродвигуна P_{cmax} при $\omega = \omega_{ном}$, тобто $P_{\bar{o}} = P_{cmax} = M_{cmax} \cdot \omega_{ном}$.

Якщо прийняти, що $M_{cmax} = M_{ном}$ ($M_{ном}$ — номінальний момент електродвигуна), то базова потужність дорівнює $P_{\bar{o}} = P_{ном}$.

Формули для обчислення P_{1*} при різних методах регулювання подачі насоса мають такий вигляд:

при регулюванні подачі через дросельну заслінку

$$P_{1*} = \frac{[\mu_{0c} + (1 - \mu_{0c}) \cdot Q_*] \cdot (1 + a \cdot S_{ном})}{1 - S_{ном}}, \quad (5.15)$$

при регулюванні подачі через зміну частоти

$$P_{*1} = [\mu_{0c} \cdot A^3 + (1 - \mu_{0c}) \cdot A^2 \cdot Q_*] \cdot \left[1 + \frac{S_n \cdot (1 + a)}{(1 - S_n) \cdot A} \right]. \quad (5.16)$$

Вирази (5.15) і (5.16) дозволяють розрахувати споживану насосом потужність при дросельному й частотному регулюванні залежно від витрати рідини Q_* і зробити порівняльну оцінку для розглянутих способів регулювання. Як треба з (5.15), (5.16), при дросельному регулюванні для заданого значення Q_* споживана потужність P_{1*} залежить від $\mu_{0c}, a, S_{ном}$, а при частотному регулюванні — від $h_c, \mu_{0c}, a, S_{ном}$. Задаючи ці параметри для конкретних умов роботи насосного агрегату й обраного двигуна або відрізка серії двигунів, можна розрахувати значення $P_{1*} = f(Q_*)$.

Вирази (5.15) і (5.16) надають можливість розрахувати споживану потужність насоса під час дросельного та частотного регулювання в залежності від обраної витрати рідини Q_* . Зокрема, з формули (5.15) видно, що при дросельному регулюванні споживана потужність P_{1*} залежить від витрати $\mu_{0c}, a, S_{ном}$, а з формули (5.16) випливає, що при частотному регулюванні потужність залежить від частоти $h_c, \mu_{0c}, a, S_{ном}$.

Параметри Q_* і f_* можна визначити відповідно до конкретних умов роботи насосного агрегату та вибору певного двигуна або серії двигунів. Це

дає змогу обчислити значення $P_{1*} = f(Q_*)$ при дросельному регулюванні та від f_* при частотному регулюванні. Такий підхід дозволяє проводити порівняльний аналіз обох методів регулювання для конкретних умов роботи.

У таблиці 5.1 представлені значення споживаної потужності P_{1*} у відносних одиницях як функція відносної витрати $\Delta P_{1*i} = P_{1*i1} - P_{1*i2}$ при дросельному та частотному регулюванні при $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,014$.

За допомогою формул (5.15) і (5.16) можна побудувати відомі залежності, які демонструють перевагу частотного регулювання в споживанні активної енергії порівняно з дросельним регулюванням. На рисунку 5.3 представлені ці залежності $P_{1*} = f(Q_*)$ за допомогою дросельного та частотного регулювання, побудовані по даним таблиці 5.1 для $h_c = 0$. Знаючи витрату (Q_{i*}) можливо розрахувати споживану потужність при дросельному (P_{1*i1}) та частотному регулюванні (P_{1*i2}) і визначати ефект у споживаній потужності $\Delta P_{1*i} = P_{1*i1} - P_{1*i2}$. Це дозволяє розрахувати, наскільки знижуються річні витрати за вартістю електроенергії при використанні частотного регулювання асинхронних електроприводів для насосних агрегатів у порівнянні із дросельним регулюванням.

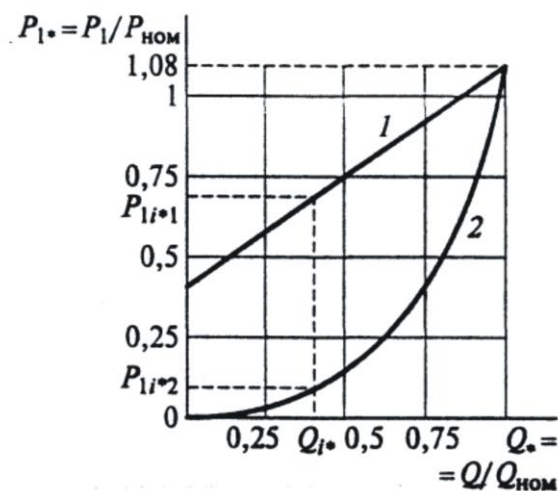


Рисунок 5.3 - Залежності $P_{1*} = f(Q_*)$ при регулюванні дросельною заслінкою (крива 1) і при частотному регулюванні (крива 2).

Таблиця 5.1- Значення спожитої електроприводом відцентрового насоса потужності методом дросельного та частотного регулювання в залежності від втрат і статичного напору

Витрата Q_*	P_{1*}					
	При дросельному регулюванні	При частотному регулюванні				
		$h_c = 0$	$h_c = 0.2$	$h_c = 0.4$	$h_c = 0.6$	$h_c = 0.8$
0	0.430	0	0.040	0.110	0.20	0.310
0.20	0.560	0.010	0.080	0.170	0.290	0.420
0.40	0.690	0.081	0.160	0.280	0.40	0.540
0.60	0.820	0.240	0.330	0.460	0.550	0.680
0.80	0.950	0.560	0.620	0.710	0.770	0.830
1,0	1.08	1.080	1.080	1.080	1.080	1.080

Як показано у таблиці 5.2, зі зростанням статичного напору (h_c), економія електроенергії при використанні частотнорегульованого асинхронного електропривода зменшується. Проте важливо відзначити, що система технологічної автоматизації здатна підтримувати сталу тиск (H) в системі незалежно від витрати рідини. Це дозволяє уникнути надмірного тиску, що є характерним для дросельного регулювання. Це особливо важливо в комунальному секторі, де вже існуючі системи, які не знаходяться в аварійному стані, можуть втрачати воду через витоки при надмірному тиску, що становить 10 м водяного стовпа, і призводить до додаткових 2-7% втрат води.

Таблиця 5.2 - Значення потужності, спожитої електроприводом відцентрового насоса для різних способів регулювання з початковим статичним моментом $\mu_{0c} = 0$ і статичним напором води $h_c = 0$

Спосіб регулювання	Q_*					
	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1,0
P_{1*} при дросельному регулюванні	0	0.220	0.440	0.630	0.840	1.040
P_{1*} при частотному регулюванні	0	0.010	0.07	0.230	0.540	1.040

Для оцінки того, як початковий статичний момент (μ_{0c}) впливає на електропотужність, таблиця 5.2 містить графіки $P_{1*} = f(Q_*)$ для обох методів регулювання - дросельного та частотного, при значеннях $\mu_{0c} = 0$ і $h_c 0$.

Порівнюючи дані в таблицях 5.1 і 5.2, помічаємо, що зі зменшенням μ_{0c} споживана потужність при використанні частотнорегульованих електроприводів також зменшується.

5.2. Впровадження перетворювача частоти.

Головним завданням при виборі приводного пристрою є правильна класифікація виконавчого механізму. Перетворювачі будуть відрізнятися за потужністю та набором функцій, залежно від області їх застосування, які гарантують вирішення відповідних технологічних завдань.

При виборі перетворювача частоти за потужністю слід враховувати такі аспекти:

1. Паспортна потужність ПЧ (кВт) повинна бути рівною або більшою за паспортну потужність електродвигуна. Важливо враховувати, що відповідно до міжнародних стандартів, поняття потужності стосується механічної потужності, що видається двигуном на його валу, а не активної потужності, яку витягують з джерела живлення, як це зазвичай прийнято для інших споживачів електроенергії.

2. Номінальний робочий струм ПЧ завжди має бути більшим за номінальний струм, який споживається електродвигуном. Інакше, може виникнути помилка «перевищення струму», яка призведе до блокування приводу.

Проаналізуємо спосіб розрахунку потужності інвертора при використанні з одним або кількома двигунами.

Спростимо розгляд роботи інвертора з одним двигуном. Для проведення розрахунків необхідно врахувати такі параметри:

P_n - номінальна потужність двигуна (кВт);

J - приведений момент інерції навантаження, який переводиться на вал двигуна ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$). Якщо вал двигуна не зв'язаний з інерційними механізмами або якщо двигун працює на холостому ходу, то приведений момент інерції буде дорівнювати моменту інерції ротора двигуна.

n – частота обертання (об/хв), до якої потрібно розігнати електродвигун за час t ;

t - час (с) на протязі якого треба розганяти електродвигун до частоти обертання n ;

U_n - значення напруги (В) на обмотках електродвигуна при номінальних оборотах;

k - коефіцієнт спотворення електричного струму на виході ПЧ.

$k = 0,95 - 1,05$; При аналізі граничних параметрів раціональніше використовувати максимальне значення коефіцієнта.

η - коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна;

$\cos\varphi$ - приймається із специфікації на електродвигун, що приблизно дорівнює 0,8- 0,85.

Проведемо розрахунок номінального моменту на валу електродвигуна:

$$M_{ном} = \frac{9555 \cdot P_{ном}}{n}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.17)$$

Визначимо динамічний момент на валу двигуна:

$$M_d = \frac{J \cdot n}{9,7 \cdot t}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.18)$$

Визначимо пускову потужність двигуна:

$$P_p = \frac{k \cdot n}{9555 \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \cdot (M_{ном} + M_d), \text{ кВт} \quad (5.19)$$

Виходячи із значення цієї величини обирається робоча потужність ПЧ, що має відповідати умові:

$$P_{пч} = P_p / 1,55 \text{ (кВт)}, \quad (5.20)$$

При цьому струм, який споживає електродвигун при здійсненні лінійного розгону, – I_d , має не перевищувати пусковий струм ПЧ.

$$I_d = \frac{k \cdot n}{9,7 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U_{ном} \cdot \sqrt{3}} \cdot (M_{ном} + M_d), \text{ А} \quad (5.21)$$

Слід врахувати, що ПЧ серії Altivar мають перевантажувальну здатність по перехідному моменту: для Altivar 61 – це 110 – 130 від % номінального моменту електродвигуна протягом 60 с.

Повна споживана двигуном потужність в номінальному сталому режимі визначається:

$$P_s = \frac{k \cdot P_{ном}}{\eta \cdot \cos \varphi}, \text{ кВт} \quad (5.22)$$

Використання ПЧ разом з декількома паралельно підключеними двигунами однакової потужності. Для цього розрахунку також знадобляться наступні параметри:

N - число двигунів, що паралельно приєднані до одного ПЧ (шт.);

N_s - число двигунів, що запускаються одночасно (шт.);

K_s – коефіцієнт кратності пускового струму рівний M_d/M_n ;

I_n - номінальний струм електродвигуна за паспортом (А);

Повна пускова потужність:

$$P_{s.n} = P_s \cdot N \cdot \left(1 + \frac{N \cdot (k_s - 1)}{N_s} \right), \text{ кВт} \quad (5.23)$$

Повний пусковий струм:

$$I_{s.n} = I_{ном} \cdot N \cdot \left(1 + \frac{N \cdot (k_s - 1)}{N_s} \right), \text{ А} \quad (5.24)$$

- На основі доступних даних обираємо ПЧ, який відповідає таким умовам:

- час розгону менше 60 с: $P_{пч} \geq 1,51 \cdot P_s$, $I_{пч} \geq 1,51 \cdot I_s$;

- час розгону більше 60 с: $P_{пч} \geq P_s$, $I_{пч} \geq I_s$;

Вибір перетворювача для управління двигунами насосів. Найбільш поширеним завданням є вибір перетворювача для управління двигунами насосів або вентиляторів.

Попередній вибір двигуна та перетворювача виконується за наступними умовами:

- потужність двигуна повинна бути більше потужності навантаження.

Вибір потужності двигуна: $P_n > P_m$ (кВт), де P_m – механічна потужність навантаження.

- типорозмір перетворювача частоти вибирається так, щоб номінальний струм двигуна I_n був менше струма на виході перетворювача частоти $I_{пч}$. Вибір типорозміру перетворювача частоти $I_{пч} > I_n$ (А).

- розрахунок моменту інерції. $J_{нав}$ – момент інерції навантаження (вентилятора або насоса) ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$) береться з технічних умов заводу виготівника; J_n – момент інерції двигуна ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$) береться з технічних умов заводу виготівника.

Вибір перетворювача для управління двигунами насосів. Вибір приводу для керування насосними або вентиляційними двигунами є поширеним завданням. Попередній вибір двигуна та приводу здійснюється відповідно до таких умов:

1. Потужність двигуна має перевищувати потужність навантаження. Вибір потужності двигуна: $P_n > P_m$ (кВт), де P_m – це механічна потужність навантаження.

2. Вибір типорозміру частотного приводу здійснюється так, щоб номінальний струм двигуна (I_n) був менший, ніж струм на виході частотного приводу ($I_{нч}$). Вибір типорозміру частотного приводу: $I_{нч} > I_n$ (А).

3. Розрахунок моменту інерції проводиться наступним чином: $J_{нав}$ – момент інерції навантаження (вентилятора або насоса) ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$) визначається на основі технічних характеристик від виробника. Момент інерції двигуна (J_n) ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$) також визначається з технічних документів виробника.

Сумарний момент інерції визначається, ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$):

$$J_s = J_{нав} + J_n \quad (5.25)$$

Перевірка часу прискорення проводиться таким чином:

$$t_a \succ \frac{J_s \cdot \Delta n}{9,55 \cdot (M_n \cdot \alpha + M_{нав} \cdot \beta)}, \text{ с} \quad (5.26)$$

де t_a - час прискорення (с);

Δn - зміна числа обертів (об/хв) за будь-який період часу t_a ;

$M_{нав}$ - момент навантаження (Н·м);

α - коефіцієнт корекції моменту при керуванні від перетворювача частоти (1,2 - 1,3);

β - коефіцієнт корекції, враховуючий зменшення обертаючого моменту електродвигуна (1,3, а для постійного моменту - 1).

Перевірка часу уповільнення здійснюється за формулою:

$$t_b \succ \frac{J_s \cdot \Delta n}{9,55 \cdot (M_n \cdot \chi + M_{нав} \cdot \beta)}, \text{ с} \quad (5.27)$$

де χ - коефіцієнт, який характеризує момент двигуна (0,1 - 0,3), та залежить від ККД електродвигуна.

Якщо потрібно зменшити швидкість під час періоду уповільнення t_b , то потрібно використовувати гальмівний модуль. В найпростішому випадку, можна визначити потужність та тип конвертера, якщо знати параметри привідного електродвигуна.

Враховуючи приведені вище рекомендації обираємо перетворювач частоти Altivar 61.

Вихідні данні електродвигуна наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3- Каталогні данні двигуна насосу.

Параметр	$P_{ном}$	$n_{ном}$	$J_{дв}$	η	$\cos\phi$
Одиниці виміру	кВт	об/хв	Н·м ²	-	-
Величина	200,0	1500,0	0,520	0,920	0,850

$$M_{ном} = \frac{9555 \cdot P_{ном}}{n} = \frac{9555 \cdot 200}{1500} = 1273,9, \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_d = \frac{J \cdot n}{9,7 \cdot t} = \frac{0,52 \cdot 1500}{9,7 \cdot 5} = 16,4, \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$P_p = \frac{k \cdot n}{9555 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \cdot (M_{ном} + M_d) =$$

$$= \frac{1,051 \cdot 1500}{9555 \cdot 0,92 \cdot 0,85} \cdot (1273,9 + 16,3) = 272,2, \text{ кВт}$$

$$P_{пч} = P_p / 1,5 = 272,2 / 1,5 = 181,1, \text{ кВт.}$$

$$I_d = \frac{k \cdot n}{9,7 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U_{ном} \cdot \sqrt{3}} \cdot (M_{ном} + M_d) =$$

$$= \frac{1,05 \cdot 1500}{9,7 \cdot 0,92 \cdot 0,85 \cdot 220 \cdot \sqrt{3}} \cdot (1273,9 + 16,3) = 714,1, \text{ А}$$

$$P_s = \frac{k \cdot P_{ном}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1,05 \cdot 200}{0,92 \cdot 0,85} = 268,5, \text{ кВт}$$

Обираємо до впровадження перетворювач частоти серії Altivar 61 типу НС 40N4 з наступними параметрами $P_{ном} = 400 \text{ кВт}$; $I_{max} = 709 \text{ А}$.

5.3. Використання перетворювачів частоти в автоматизованих системах керування

Серія Altivar 61 включає в себе перетворювачі частоти, які призначені для роботи з трифазними асинхронними двигунами потужністю від 0,75 кВт до 800 кВт. Schneider Electric випускає перетворювачі частоти Altivar 61 у виконанні для шафи потужністю від 110 до 800 кВт. Вони мають ступінь захисту IP54 і комплектуються всім необхідним допоміжним обладнанням, яке спрощує процес проектування систем управління. Це означає, що перетворювач готовий до використання і легко вводиться в експлуатацію.

На рисунку 5.5 представлено типову схему підключення перетворювача Altivar 61 з управлінням через дискретні та аналогові входи та

виходи контролера. У перетворювача є шість дискретних входів позначених як Li1 - Li6. На ці входи можуть подаватися логічні сигнали напругою 0/+24В, як прямої, так і зворотної логіки, і ці сигнали можуть бути походити з виходів контролера, модулів розподіленого введення-виводу або інших логічних пристроїв. Якщо керування здійснюється від транзисторних виходів контролера, то важливо підключити шину "0V" живлення виходів контролера або інших логічних пристроїв до клеми "0V" перетворювача.

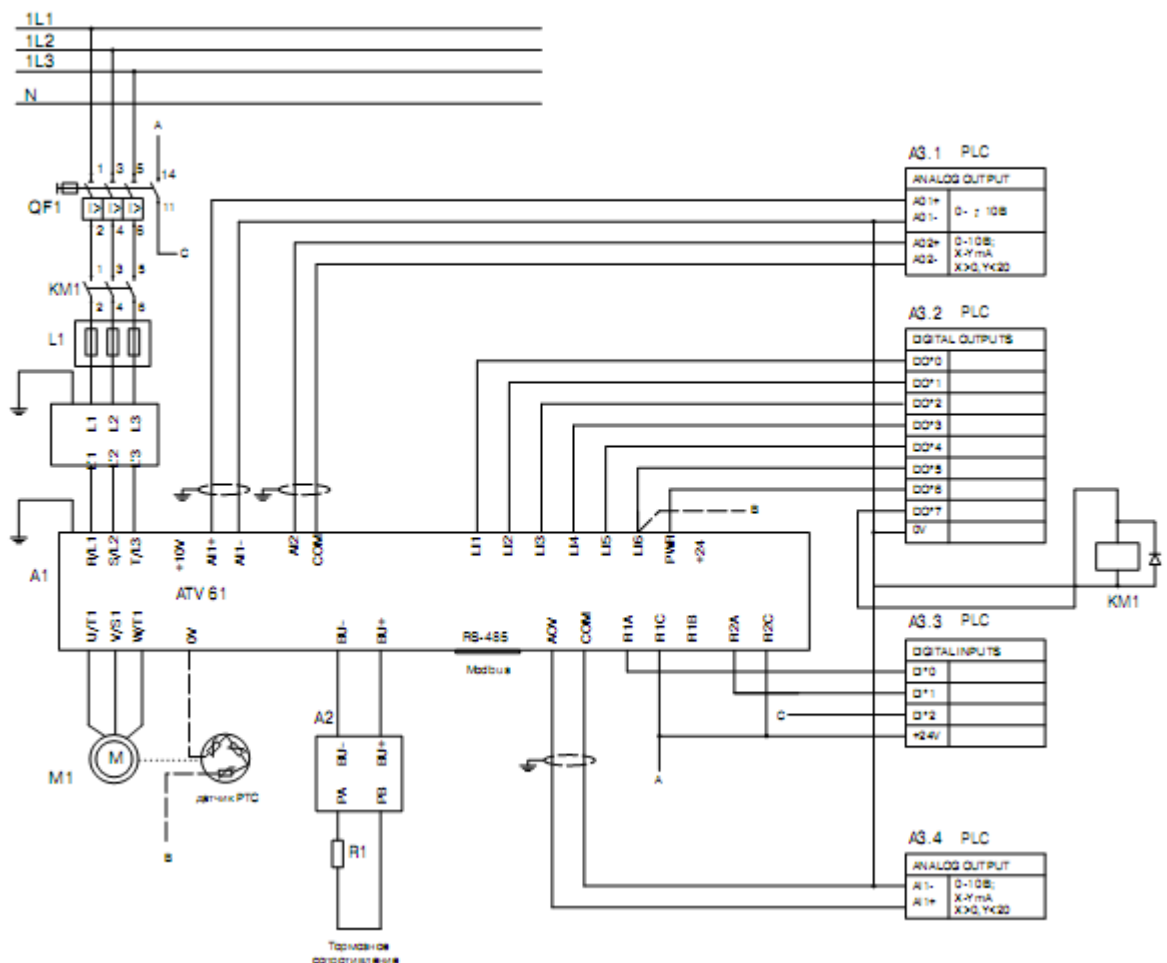


Рисунок 5.5 – Керування ПЧ Altivar 61 від PLC.

Для ефективного налаштування перетворювача частоти Altivar 61 для управління кількома насосними агрегатами (до 6 пристроїв, які перемикаються), можна використовувати карту перемикання насосів, як, наприклад, VW3 A5 502 або VW3 A5 503.

Карта перемикання насосів представляє дві основні функції:

1. Функція "Monojoker" дозволяє обирати лише один конкретний агрегат як основний.
2. Функція "Multijoker" дозволяє вибирати будь-який агрегат як основний.

Вибір основного агрегату здійснюється на основі часу експлуатації: вибирається агрегат з найменшим накопиченим часом роботи. Для активації додаткових агрегатів можуть використовуватися наступні принципи:

- Збільшення індексів дискретних виходів.
- Мінімальний час накопиченої роботи.
- Відносна тривалість функціонування.

Деактивація додаткових агрегатів виконується відповідно до вибраного режиму, керуючись наступними принципами:

- Зменшення індексів дискретних виходів.
- Облік максимального часу роботи.
- Врахування відносної тривалості функціонування.

Відносна тривалість функціонування кожного агрегату регулюється з метою забезпечення рівномірної ефективності використання ресурсів насосів.

5.4. Електромагнітна сумісність (ЕМС) перетворювача частоти з мережею живлення

Дослідження та наявний практичний досвід свідчать, що частотнорегульовані асинхронні електроприводи вносять різноманітні особливості і мають вплив на електромагнітні та електромеханічні процеси при роботі в постійних режимах, під час коротких замикань, автоматичного відновлення роботи (АВР) та автоматичного запуску. Тим часом, процеси комутації в інверторах частоти, які супроводжуються різкими змінами параметрів ланцюгів, призводять до спотворень форми напруги і струму як у мережі живлення, так і в електродвигунах-асинхронниках. Ці спотворення

супроводжуються виробленням вищих гармонік та перенапруженнями на статорі двигуна.

Все це підкреслює важливість забезпечення електромагнітної сумісності перетворювачів частоти як з системою живлення, так і з привідними асинхронними двигунами. Під електромагнітною сумісністю мається на увазі здатність електроустановок працювати в заданому електромагнітному середовищі без виклику неприпустимого електромагнітного впливу (неприпустимих перешкод) на це середовище та наявні пристрої в ньому.

Проблема електромагнітної сумісності між перетворювачами та електричними мережами переважно виникає внаслідок спотворення форми напруги, яка живить перетворювачі, та струму, який вони споживають.

Для зменшення гармонійних компонент струму існують різні рішення, такі як:

- Використання мережевих дроселів.
- Впровадження дроселів постійного струму.
- Використання пасивних фільтрів.
- Використання пасивних фільтрів у поєднанні з дроселями постійного струму.

Ці чотири підходи можуть бути застосовані для однієї та тієї ж електротехнічної системи.

Мережеві дроселі представляють собою простий метод зменшення рівня вищих гармонік струму, які генеруються нелінійними навантаженнями та подаються в зовнішню мережу. Ця задача вирішується шляхом послідовного підключення лінійних дроселів, як показано на Рисунку 5.6. Такий дросель має низький індуктивний опір при основній частоті 50 Гц та значно вищі опори для гармонік, що сприяє їхньому зниженню.

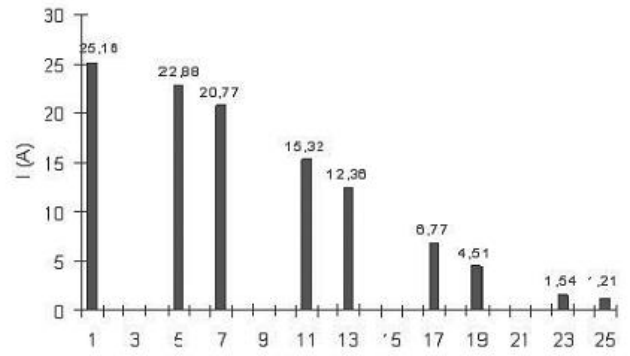
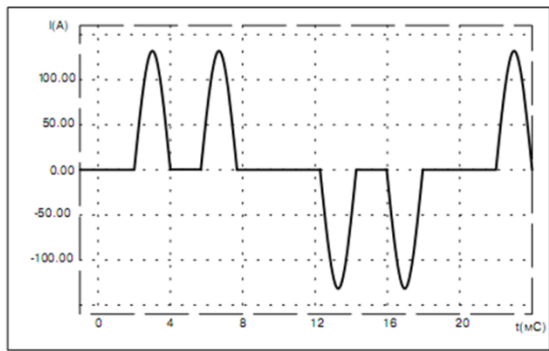


Рисунок 5.6 – Характеристики струмів нелінійних навантажень та значення гармонік без використання дроселів

При цьому зменшується коефіцієнт спотворення амплітуди струму - k_a та коефіцієнт спотворення діючої величини вхідного струму - k_g .

$$k_a = I_{im} / I \quad (5.28)$$

де: I_{im} - амплітуда імпульса струму,

I - діюча величина несинусоїдального струму.

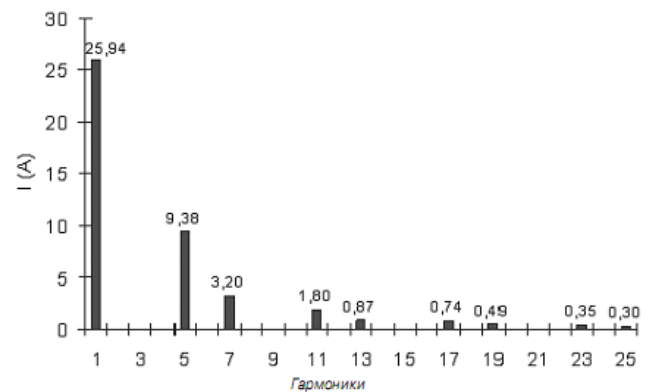
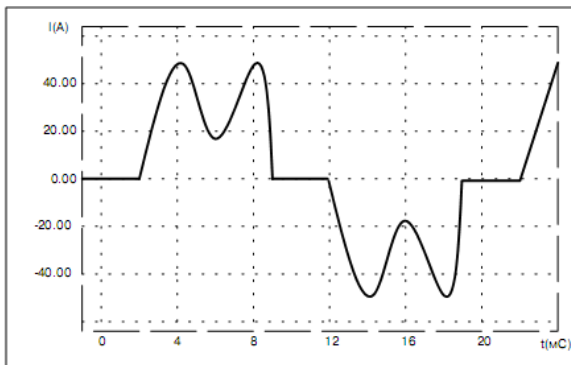


Рисунок 5.7 – Характеристики струмів нелінійного навантаження та значення гармонік при послідовному підключенні дроселів

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{i=2} I_n^2}, \text{ A} \quad (5.29)$$

де: I_1 - діюча величина основної (першої) гармоніки струму,

I_n - діюча величина «n»-ої гармоніки струму.

Коефіцієнт спотворення величини діючого струму визначається за формулою:

$$k_g = \frac{\sqrt{\sum_{i=2} I_n^2}}{I_1}, \quad (5.30)$$

Мережевий дросель виконує захисну функцію для перетворювача частоти, обмежуючи швидкість наростання струму короткого замикання та стабілізуючи струм короткого замикання на виході. Це сприяє успішному використанню струмового захисту перетворювача частоти при коротких замиканнях.

Пасивні фільтри, що використовуються як додаткове або вбудоване обладнання для всіх типів перетворювачів, застосовуються для зниження гармонійних компонент струму в першій зоні при використанні перетворювачів. Також, подібно до мережевих дроселів, вони розташовуються на живленні безпосередньо перед перетворювачем частоти.

Пасивний фільтр дозволяє знизити гармоніки струму до рівня спотворення менше 10-16%. Ці спотворення можуть бути подальшим чином зменшені до 5-10% за умови використання їх разом з дроселем постійного струму. Однак, недоліком використання пасивних фільтрів є збільшення реактивної потужності при роботі на холостому ході або при низькому навантаженні.

Дроселі постійного струму підключаються до спеціальних клем перетворювача частоти та становлять додаткову ланку в силовому випрямлячу фільтра. Вони виявляються ще більш ефективними, ніж мережеві дроселі, оскільки покращують коефіцієнт потужності і більш інтенсивно пригнічують вищі гармоніки. Дроселі постійного струму дозволяють зменшити гармонійні компоненти струму до відповідності стандарту ІЕС 61000-3-2 для перетворювачів частоти, які споживають мережевий струм від 16 до 75 А. Перетворювач, обладнаний дроселем постійного струму, відповідає вимогам стандарту ІЕС 61000-3-5.

Отже, використання дроселів постійного струму призводить до наступних позитивних результатів:

- Зниження гармонійних компонент струму.
- Збереження моменту двигуна в порівнянні з використанням мережевого дроселя.
- Зниження загального коефіцієнта гармонік на 5-10% порівняно з використанням пасивних фільтрів.

Усі *перетворювачі частоти з серії Altivar* оснащені вхідними фільтрами для пригнічення радіоперешкод відповідно до стандартів ІЕС 61800-3 та EN 61800-3, що відповідає вимогам Європейського Союзу з питань електромагнітної сумісності. Додаткові фільтри задовольняють найжорсткішим вимогам: вони призначені для зниження наведеного випромінювання в мережу нижче від рівнів, які встановлені стандартами EN 55011 (клас А (1)) або EN 55022 (клас В).

ЕМС перетворювачів частоти і установки компенсації реактивній потужності. Проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) перетворювачів частоти та систем компенсації реактивної потужності може призвести до резонансних явищ у низьковольтних розподільних мережах. Ця проблема може виникнути незалежно від методу компенсації реактивної потужності (централізована, групова або індивідуальна). Небезпека полягає в тому, що резонансні явища на вищих гармоніках можуть спричиняти значні спотворення струмів і напруги в розподільних мережах, а також призводити до перевантаження силових конденсаторів.

У процесі пуску та гальмування перетворювача частоти, який працює з управлінням силових модулів широтноімпульсною модуляцією, виникає високочастотна перешкода зі змінним спектром. Встановлення конкретної частотної області виникнення резонансу у цьому випадку є складним завданням. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання частотнорегульованих приводів, які відповідають певним стандартам і мають настільки низьку рівень наведеного та випромінюваного перешкод, що не викликають резонансних явищ.

До таких частотнорегульованих приводів відносяться перетворювачі, які обладнані вбудованими або додатковими фільтрами для електромагнітної сумісності (ЕМС). Найбільш ефективне пригнічення радіоперешкод може бути досягнуте за умови використання одночасно ЕМС фільтрів та мережевих дроселів. Остаточним висновком є те, що у низьковольтних розподільних мережах, де встановлені системи компенсації реактивної потужності, допустимим є використання лише перетворювачів частоти, обладнаних фільтрами для електромагнітної сумісності і мережевими дроселями.

5.5. Плавний пуск високовольтних електродвигунів насосних установок.

Вибір методу запуску високовольтних електродвигунів визначається з урахуванням наступних критеріїв:

1. Під час запуску двигуна не повинно відбуватися значного падіння напруги в мережі, яке могло б вплинути на нормальну роботу інших споживачів, що підключені до цієї мережі. Зниження напруги під час запуску на 10 кВ шинах джерела живлення не повинно перевищувати 10-15% від номінальної напруги при живленні освітлювального та змішаного навантаження, і до 20-25% при живленні виключно силового обладнання (допускається 25% під час рідких запусків, не частіше одного разу за зміну).

2. Перевищення трансформатором допустимих значень перевантаження внаслідок пускових струмів не повинно перевищувати раніше встановлені ліміти, які залежать від кількості запусків на добу і їх тривалості. Для оцінки можливості перевантаження трансформатора пусковими струмами проводяться випробування при тривалості запуску понад 15 секунд. З точки зору динамічного впливу на трансформатор допускається проведення трьох запусків за добу при перевантаженні в чотириразовому розмірі потужності для трансформаторів з потужністю до 25

МВА включно і удвічі більше потужності для трансформаторів з потужністю від 40 до 100 МВА. З точки зору теплового впливу, потужність, тривалість і число запусків обмежуються максимальною температурою обмоток трансформатора, яка не повинна перевищувати 160 °.

У кваліфікаційній роботі розглядається використання пристроїв плавного пуску для високовольтних насосних електродвигунів. Безперечно, пускові струми електродвигунів великої потужності при включенні в роботу можуть бути значно вищими, що веде до інтенсивного зношування підключеного обладнання внаслідок різкого розгону ротора. Відключення та підключення таких електродвигунів обмежуються з метою раціонального використання устаткування та зменшення споживаної електроенергії та охолоджуючої рідини. Пристрій для плавного пуску дозволяє включати та вимикати насоси у будь-який момент, навіть на протязі годин. Це значно зменшує витрати електроенергії. Принципово важливо застосовувати пристрій плавного пуску на синхронних та асинхронних електродвигунах потужністю від 400 до 12500 кВт, таких як компресори, насоси та вентилятори. Програмований пристрій використовується для поступового (плавного) розгону електродвигуна до досягнення певної кількості обертів.

Переваги пристрою плавного пуску включають:

1. Зниження пускових струмів у 4-7 разів.
2. Зменшення витрат охолоджуючої води.
3. Мінімізація обводнювання пневмосистеми.
4. Запобігання небезпечному падінню напруги в електричній мережі під час пуску.
5. Збільшення припустимої кількості пусків електродвигунів потужністю понад 1 мВт до капітального ремонту від 50 до необмеженої кількості разів. Можливі будь-які інтервали між включеннями без негативних наслідків для запускаемого двигуна.
6. Сумісність з синхронними і асинхронними двигунами будь-якої потужності.

7. Можливість автоматизації включення та вимикання електродвигунів.
8. Не потребує спеціалізованого сервісного обслуговування та витрат на ремонт.
9. Ефективне прибирання гармонік, які можуть передаватися в електричну мережу.

Пристрій УБПВД-В призначається для безударного плавного пуску високовольтних асинхронних і синхронних двигунів в механізмах з вентиляторною характеристикою. Цей пристрій працює на основі тиристорного регулятора напруги, як показано на Рисунку 5.5. Він здатний обмежувати швидкість зростання напруги та пусковий струм електродвигуна, за допомогою регулювання кутів відмикання тиристорів через систему імпульсно-фазового управління (СІФУ). Під час пуску електродвигуна, напруга на обмотках статора плавно збільшується від нуля до номінального значення протягом визначеного часу. Пусковий струм також плавно зростає з обмеженням струму, що дозволяє уникнути різких електромагнітних моментів, які можуть негативно позначитися на електродвигуні та механізмі.

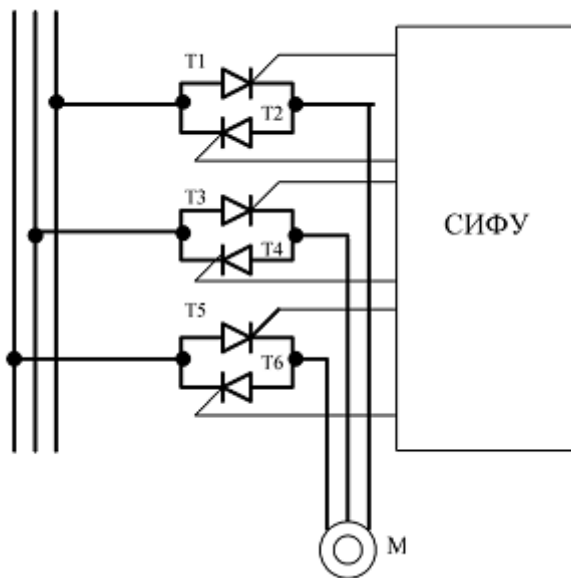


Рисунок 5.8 – Схема пристрою УБПВД-В.

З метою економії ресурсів була розроблена та успішно впроваджена система безударного пуску (СБП), яка дозволяє одному пристрою УБПВД

керувати декількома електродвигунами, що підключені до однієї або декількох секцій шин. СБП надає можливість виконувати як прямі, так і послідовні безударні пуски будь-якого обраного електродвигуна під контролем спеціального контролера, який унеможливорює виникнення аварійних ситуацій внаслідок помилкових дій операторів. Використання СБП дозволяє значно зменшити витрати порівняно з сценарієм, де кожен електродвигун запускається окремо від індивідуального пристрою УБПВД. Наприклад, при запуску чотирьох електродвигунів використання СБП призводить до практично до трійної економії.

СПБ здатний послідовно запускати практично будь-яку кількість електродвигунів з одного пристрою УБПВД, який працює в рамках одного розподільчого пристрою 6 (10) кВ. Рисунок 5.9 показує схему системи, побудованої на основі пристрою УБПВД-В для пуску чотирьох електродвигунів, які приєднані до двох різних секцій шин. У схемі на рисунку 5.9 використані наступні позначення:

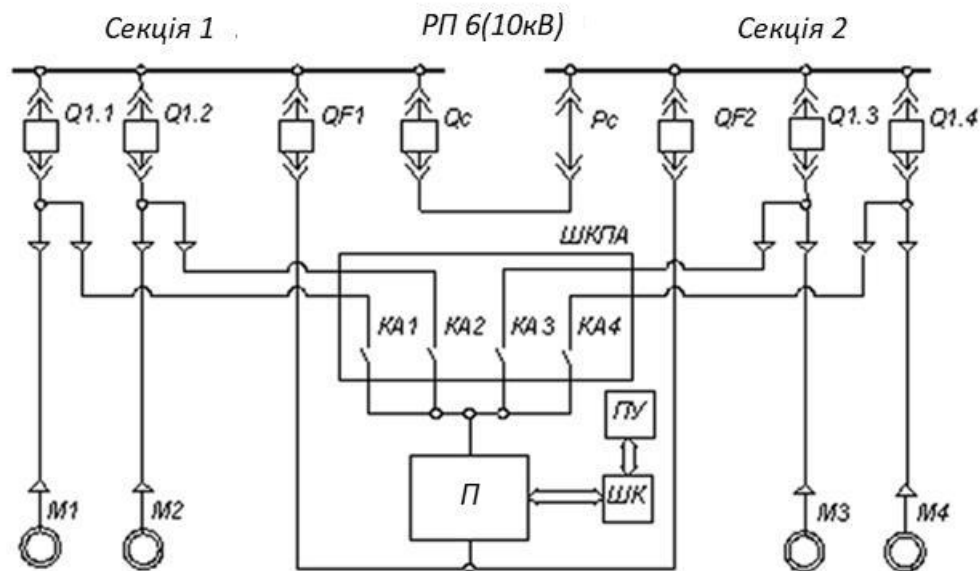


Рисунок 5.9 – Однолінійна схема системи безударного пуску високовольтних електродвигунів на базі пристрою УБПВД-В.

П- пристрій безударного пуску УБПВД-В;

М1-М4 –двигуни, які запускаються;

Q1.1- Q 1.4 – робочі високовольтні вимикачі;

Qf1, Qf2 – пускові високовольтні вимикачі;

КА1- КА4 – пускові високовольтні комутаційні апарати.

ШК – шафа автоматики з програмованим контролером;

ПУ – пульт управління.

Для прикладу, процедура безударного пуску двигуна М1 проходить наступним чином. Якщо всі передпускові умови виконані, на дисплеї з'являється повідомлення "Пуск дозволений", і оператор, натиснувши кнопку "Пуск", активує алгоритм безударного пуску двигуна М1:

- Комутуючий апарат КА1 вмикається, і двигун М1 підключається до виходу пристрою В.

- Головний вимикач Qf1 увімкнений, і пристрій В підключається до секції 1 збірних шин. Виконується самодіагностика елементів силового ланцюга пристрою УБПВД-В під робочою напругою. При успішному результаті тесту тиристори пристрою В відмикаються, і розпочинається розгін двигуна.

- Після завершення розгону пусковий струм знижується до рівня, визначеного фактичним навантаженням двигуна, і вмикається робочий вимикач Q1.1. Тиристори закриваються, і пристрій У вмикається від секції 1 за допомогою вимикача Qf1. Також вмикається комутуючий апарат КА1. Після цього процедура пуску завершується, і система безударного пуску готова для запуску наступного двигуна.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

6.1. Оцінка економічної ефективності від впровадження перетворювачів частоти.

Масове поширення приводів частотного перетворення (ПЧ) у системах управління електродвигунами визначається потенційним економічним вигодою. Найбільше економічне підвищення досягається в разі використання частотних перетворювачів у системах управління електродвигунами насосних установок.

Ця проблема знайома з важливим завданням визначення економічної ефективності. Потенційні користувачі ПЧ часто мають бажання отримати гарантії віддачі інвестованих коштів перед їх придбанням. На жаль, немає загальноприйнятої методики для всіх випадків використання ПЧ через значну різноманітність реальних технологічних систем. В цьому контексті, розгляд методів оцінки економічної ефективності може бути проілюстрованим на прикладах конкретних пристроїв. В певних випадках розрахунки економічної ефективності можуть бути проведені на основі експериментальних даних, без складних математичних обчислень.

В інформаційних джерелах активно розглядаються теоретичні аспекти економії споживання енергоресурсів. Однак у багатьох випадках ці обговорення обмежуються економією електроенергії або тепла, не враховуючи повний обсяг економічного вигоди. Основна частина цієї вигоди включає в себе не лише зменшення споживання енергоресурсів, але й інші аспекти, такі як зниження аварійності, зменшення часу простою обладнання, скорочення потреб у обслуговуючому персоналі, а також зменшення витрат на заміну обладнання.

Отже, використання частотних перетворювачів (ПЧ) під час функціонування системи сприяє досягненню економії завдяки наступним чинникам:

- Зменшення витрат електроенергії.
- Зниження втрат на етапі технологічних процесів.
- Зниження витрат на ремонтні роботи і скорочення термінів простою обладнання.

Зниження споживання електроенергії в насосних станціях може бути досягнуте через збільшення моменту навантаження на валу двигуна зі збільшенням швидкості обертання. Насоси та вентилятори, зокрема, мають квадратичну механічну характеристику, що означає, що споживана потужність двигуна збільшується квадратично зі збільшенням швидкості обертання. І це означає, що навіть невелике зниження швидкості обертання двигуна може призвести до значного зменшення споживаної потужності. Ось чому економія електроенергії вважається основною перевагою використання керованого електроприводу для насосів та вентиляторів.

Оскільки тиск у системі перед насосом і витрата води споживачами постійно змінюються, встановлені в системі регулюючі дросельні елементи (інколи напірні засувки агрегатів грають роль регуляторів тиску). Ці елементи створюють додатковий гідравлічний опір і забезпечують стабільний тиск у трубопровідній системі. Однак використання їх призводить до втрат електричної енергії впродовж технологічного процесу, які можуть становити до 50%. Щоб мінімізувати ці втрати, пов'язані із регулюванням тиску у мережі, необхідно припинити використання додаткових гідравлічних опор на ділянках від насосів до мережевих трубопроводів. Іншими словами, потрібно повністю відкрити всю запорно-регулюючу арматуру. Це можливо, якщо процес регулювання тиску в мережі здійснюється за допомогою насоса, чий оберти регулюються за допомогою ПЧ. При такому методі регулювання можливо уникнути втрат тиску (відсутність дросельних елементів) і, отже, зменшити втрати електричної енергії.

Використання ПЧ суттєво знижує і витрати, пов'язані з обслуговуванням агрегатів і систем. Наприклад, зменшення перепаду тиску між всмоктуючим і напірним патрубками насосного агрегату продовжує термін служби сальникових ущільнень, мінімізує гідроудари та забезпечує стабільність тиску в мережах трубопроводів. Це призводить до зменшення витрат на обслуговування та збільшує тривалість роботи системи.

При вирішенні питання щодо впровадження перетворювачів частоти марки Altivar виробництва Schneider Electric, необхідно враховувати, що використання ПЧ порівняно з прямим пуском системи має додаткові позитивні аспекти для системи управління:

- Зменшується ступінь зносу комутаційної апаратури завдяки перемиканню без струму.
- Забезпечується одночасний захист двигуна від короткого замикання, замикання на землю, перевантаження, неповнофазного режиму та надмірних напруг.
- Знижується рівень шуму, що є особливо важливим, коли насоси розташовані поруч з житловими або офісними приміщеннями.
- Спрощується подальша інтеграція автоматизації для об'єктів системи водопостачання.

В джерелах [10,11] наводиться методика оцінки економічної ефективності вживання частотно-регульованого електроприводу в системах водопостачання.

6.2. Розрахунок річної економії енергоресурсів та терміну окупності устаткування

Інструкція для розрахунку економічної ефективності частотно-регульованого електропривода [10] розглядає основні аспекти зменшення енергоспоживання і дає можливість оцінити попередні резерви ефективності

в системах загального призначення, таких як насоси та вентиляційні установки.

Але в інструкції не враховані інші переваги, пов'язані із використанням частотно-регульованих електроприводів, такі як поліпшення динаміки перехідних процесів, зниження витрат на обслуговування, зменшення рівня шуму і інші.

Ця інструкція стосується систем, які перебувають у виробництві, тобто у випадках, коли проектна технологічна схема не змінюється. Для нових систем з частотно-регульованими електроприводами має бути врахована можливість спрощення і зменшення вартості технологічних схем, такі як відмова від використання зворотних клапанів у насосах, виключення заслінок та засувок, зменшення кількості насосів і вентиляторів тощо.

Для ілюстрації визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження розглянемо методику розрахунку ефективності використання частотно-регульованого електропривода (ЧРЕ).

Згідно цієї методики, визначення економічного виграшу проводиться на основі таких вимірювань та розрахунків:

1. Збирають паспортні дані насосів і електродвигуна на місці, безпосередньо на обладнанні насосної станції.

Таблиця 6.1 Паспортні дані насосної установки і електродвигуна

номінальний напір насоса	$H_{\text{ном}}, \text{м.}$	56,0
номінальна продуктивність	$Q_{\text{ном}}, \text{м}^3/\text{год}$	800,0
номінальний ККД насоса	$\eta_{\text{ном.н}}$	0.70
номінальна потужність двигуна	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	200,0
номінальний ККД електродвигуна	$\eta_{\text{ном.д}}$	0.920

2. В піковий час використання води (8-10 година ранку або 18-20 година вечора), проводять вимірювання діючого тиску на вході насоса ($H_{\text{вх}}$), на виході насоса ($H_{\text{вих}}$) та на виході в магістраль ($H_{\text{вих.дрос.}}$). Виміри здійснюються за допомогою вбудованих манометрів, встановлених у

системі. Протягом двох годин здійснюють кілька вимірювань і обчислюють середнє значення цих трьох параметрів.

3. Вимірюють середньогодинний об'єм води, використаний протягом доби (Q_{cp} , м³/год), визначаючи різницю показів витратоміра на початку контрольного періоду (Q_1) та в кінці його (Q_2).

$$Q_{cp} = \frac{Q_2 - Q_1}{24} = \frac{1260 - 600}{24} = 25 \text{ м}^3/\text{год}.$$

4. Встановлюють мінімально необхідний загальний тиск ($H_{необх}$):

$$H_{необх} = CN + D = 3 \cdot 14 + 16 = 58$$

де N – кількість поверхів у найвищому будинку в регіоні, який підключений до даної насосної станції, $N = 14$; C – коефіцієнт, який приймається рівним 3 для типових будівель, або 3,5 – для будівель підвищеної комфортності; доданок D встановлюється на рівні 10 для окремих будинків, або 15 – для групи ізольованих будівель. Крім того, необхідний напір повинен бути скоректований виходячи з географічної різниці висот місцевості, так як це може відповідати перепадам 15-20 м. Найбільш точним є визначення різниці висот між місцем розташування насоса і найбільш високою точкою приймача води, який підключений до магістралі.

5. Визначають необхідний тиск ($H_{потр}$), що забезпечується регулюючим насосом:

$$H_{потр} = H_{необх} - H_{вх} = 58 - 40 = 18 \text{ м}$$

У випадку значної зміни тиску в магістральному трубопроводі, значення $H_{вх}$, яке слід враховувати, має бути мінімальним.

$$H_{вх} = H_{вх \min} = 40 \text{ м}$$

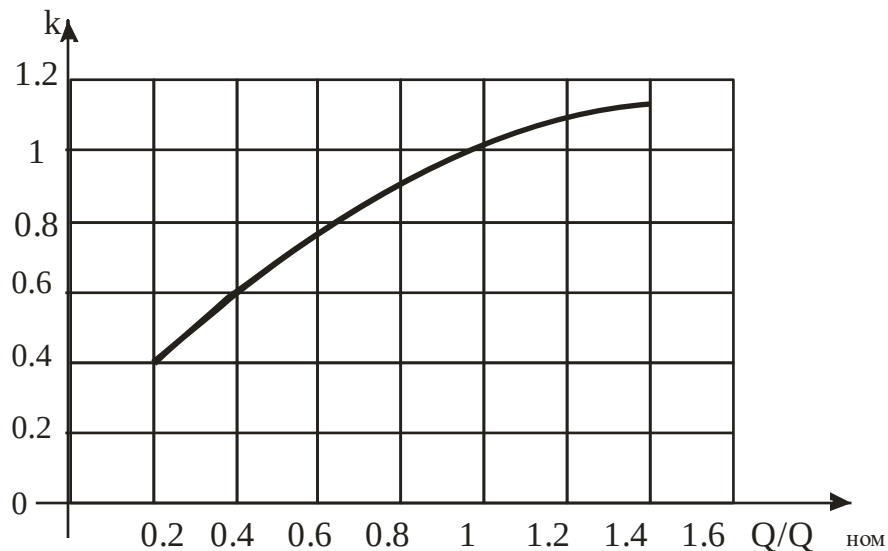


Рисунок 6.1 Визначення коефіцієнту k за допомогою кривої витрати Q_{cp} , раніше виміряної та віднесеної до $Q_{ном}$.

6. Річна економія електроенергії ($\Delta E_{ек}$) обчислюється за виразом:

$$\begin{aligned} \Delta E_{ек} &= \Delta E_{річ} \cdot C_e = \frac{(H_{вих} - H_{необх})}{367 \cdot \eta_n \cdot \eta_{ном.дв}} \cdot t_{річ} \cdot C_e = \\ &= \frac{(70 - 56) \cdot 27}{367 \cdot 0,7 \cdot 0,92} \cdot 8760 \cdot 2,7 = 37810,7 \text{ грн / рік} \end{aligned}$$

де $\Delta E_{річ}$ - електроенергія, зекономлена за рік, кВт/год; $t_{год}$ - кількість годин роботи обладнання за рік; C_e - вартість 1 кВт/год електроенергії.

7. Річна економія води ($\Delta B_{ев}$) шляхом зменшення втрат обчислюється:

$$\begin{aligned} \Delta B_{ев} &= \Delta B_{річ} \cdot C_v = 0,07 \cdot \frac{(H_{вих.дрос} - H_{необх})}{10} \cdot Q_{cp} \cdot t_{річ} \cdot C_e = \\ &= 0,07 \cdot \frac{(98 - 56) \cdot 27}{10} \cdot 8760 \cdot 42 = 2920,6 \text{ тис. грн / рік} \end{aligned}$$

де $\Delta B_{річ}$ - вода, зекономлена протягом року, м³; C_v - вартість 1 м³ води.

8. При передачі гарячої води втрати тепла збільшуються через підвищення тиску. Для типових розрахунків, річна економія тепла ($\Delta E_{ет}$) внаслідок зменшення втрат гарячої води при наявності централізованих теплових пунктів (ЦТП) або котельень обчислюється як 0.4 від загальної витрати води, що подається насосною станцією:

$$\begin{aligned} C_{em} &= \Delta\Theta \cdot C_m = \Delta t \cdot 0.4 \cdot \Delta B_{pic} \cdot C_m = \\ &= 20 \cdot 0.4 \cdot 2920,6 \cdot 29 = 677,6 \text{ тис. грн / рік} \end{aligned}$$

де $\Delta\theta$ - кількість зекономленого протягом року тепла, Гкал; Δt - розрахунковий перепад температури перегріву гарячої води при використанні нормативного значення 60 °C; C_m - вартість 1гектокалорії тепла в даному регіоні.

9. Розрахунковий період для повернення інвестицій $T_{ок}$ у встановлений частотно-регульований електропривід становить:

$$T_{ок} = \frac{C_{пч}}{C_{ек} + C_{ев} + C_{em}} = \frac{86760}{1677,6 + 2920,6 + 37810,7} = 0,2 \text{ року}$$

де $C_{пч}$ – вартість частотного перетворювача, включаючи витрати на проектування та монтаж:

$$\begin{aligned} C_{пч} &= C_{обл} + C_{мон} \\ C_{обл} &= C_{пч} + C_{пр} = 46000 + 26300 = 72300 \text{ грн} \\ C_{мон} &= 20\% \cdot C_{обл} = 20\% \cdot 72300 = 14460 \text{ грн} \\ C_{пч} &= 72300 + 14460 = 86760 \text{ грн} \end{aligned}$$

Слід відзначити, що можливе скорочення періоду окупності може бути досягнуте шляхом зниження витрат на технічне обслуговування та подовження строку амортизації обладнання.

Структура збереження річних витрат складається наступним чином: 13...15 % - зменшення витрати енергії; 63...64 % - економія від зниження витрати води; 21...24 % - економія від скорочення витрат на очищення стічних вод. Енергетична складова збереження є менш важливою порівняно зі зменшенням витрати води.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

Перелік основних заходів для забезпечення безпеки під час виконання робіт у електроустановках поділяється на три категорії: роботи за нарядом-допуском (в далішому - наряди), роботи за розпорядженням та роботи в рамках поточної експлуатації.

Організаційні заходи для забезпечення безпеки робіт у електроустановках включають такі:

- Затвердження переліку робіт, які виконуються за нарядами, розпорядженнями та в рамках поточної експлуатації.
- Призначення відповідальних осіб, які забезпечують безпечну проведення робіт.
- Оформлення робіт за допомогою нарядів, розпоряджень або затвердження переліку робіт, які виконуються в рамках поточної експлуатації.
- Підготовка робочих місць.
- Допуск працівників до виконання робіт.
- Нагляд під час виконання робіт.
- Переведення на інше робоче місце.
- Оформлення перерв в роботі та завершення робіт.

Особи, відповідальні за безпеку робіт у електроустановках, включають:

- Працівника, який видає наряди та розпорядження.
- Працівника, який дозволяє підготовку робочого місця.
- Працівника, який приготує робоче місце та надає допуск.
- Працівника, який допускає до виконання робіт (далі - допускач).
- Керівника робіт.
- Працівника, який наглядає за безпечним виконанням робіт (далі - наглядач).
- Члени бригади.

Працівник, який видав наряд або розпорядження, забезпечує можливість виконання роботи в безпечних умовах. Він несе відповідальність за належність та правильність зазначених у наряді заходів щодо безпеки, а також за відповідність якісного та кількісного складу бригади та призначення працівників, відповідальних за безпечну виконання робіт. Він також переконується, що групи електробезпеки працівників, зазначені в наряді, відповідають роботі, яку вони виконують.

Працівник, який видає наряд, повинен визначити вміст розділу "Окремі вказівки" в наряді у випадках, передбачених Правилами безпеки експлуатації електроустановок.

Право видачі нарядів та розпоряджень належить адміністративно-технічним працівникам підприємства з групою V в електроустановках з напругою понад 1000 В та групою IV - в електроустановках з напругою до 1000 В.

Особи, які складають та затверджують перелік робіт, які виконуються в рамках поточної експлуатації, визначають необхідність, можливість та регулярність безпечного виконання цих робіт з огляду на місцеві умови, а також кількісний та якісний склад виконавців для кожного виду робіт.

Працівник, який надає дозвіл на підготовку робочих місць та допуск до робіт, несе відповідальність за належність заходів, передбачених для безпечного виконання робіт, у тому числі вимкнення та заземлення обладнання та можливість їх виконання. Він також відповідає за узгодження часу та місця роботи для допущених бригад.

Право давати дозвіл на підготовку робочих місць та допуск мають оперативні працівники з групою V в електроустановках з напругою понад 1000 В і групою IV в електроустановках з напругою до 1000 В.

Працівник, який підготовлює робоче місце, відповідає за належне виконання заходів щодо підготовки робочого місця, зазначених в наряді, а також за виконання умов роботи, які вимагаються (встановлення замків, плакатів та огорож). Право підготовки робочих місць мають чергові або

оперативно-ремонтні працівники, які мають допуск до оперативних перемикань в даній електроустановці.

Допускач відповідає за коректність та адекватність вжитих заходів безпеки, а також їх відповідність характеру та місцю роботи, зазначених у наряді. Він також відповідає за правильний допуск працівників до роботи та за заповненість та якість проведеного ним інструктажу.

Допускачами можуть бути призначені оперативні працівники або працівники, які виконують оперативні та ремонтні функції. У електроустановках із напругою понад 1000 В допускачі повинні мати групу IV, а в електроустановках із напругою до 1000 В – групу III.

Керівник робіт має наступні відповідальності:

- Забезпечення виконання заходів безпеки, визначених у наряді чи розпорядженні, та переконання у їх адекватності.
- Проведення чіткого та повного інструктажу для членів бригади.
- Перевірка наявності, стану та правильного використання необхідних засобів захисту, інструментів, інвентарю та пристосувань.
- Збереження та підтримання на робочому місці заземлень, огорожень, знаків безпеки, запірних пристроїв протягом робочої зміни.
- Організація та безпечне виконання робіт та дотримання цих Правил.

Керівник робіт повинен наглядати за членами бригади та вживати заходів для виправлення порушень цих Правил. Він також має забезпечити, щоб роботі відсутні були особи у стані алкогольного або наркотичного сп'яніння або хворі. Під час виконання робіт в електроустановках понад 1000 В керівник робіт повинен мати групу електробезпеки IV, і групу III - в електроустановках до 1000 В.

Наглядач визначається для спостереження за бригадами будівельників, різноробочих, такелажників та інших працівників, які не мають електротехнічної спеціалізації, під час виконання робіт в електроустановках згідно з нарядами та розпорядженнями.

Наглядач, який має навички у сфері електротехніки, включаючи відряджених спеціалістів, призначається, коли роботи в електроустановках відбуваються в особливо небезпечних умовах. Рішення про це приймає особа, відповідальна за електрогосподарство на підприємстві.

Наглядач відповідає за перевірку наявності на робочому місці заземлень, огорожень, плакатів та запірних пристроїв, і гарантує безпеку працівників бригади від можливого ураження електричним струмом.

Наглядачам заборонено поєднувати нагляд із виконанням будь-яких інших робіт, а також залишати бригаду без нагляду під час роботи.

На посаду наглядача призначаються електротехнічні працівники, які мають групу безпеки III.

Особи, які мають повноваження видавати наряди, розпорядження, бути керівниками робіт, а також допускачі, зазначені в розділі 3.2.1 цих Правил, визначаються відповідальним за електрогосподарство підприємства та затверджуються керівником підприємства.

Ці переліки працівників і переліки робіт, які можуть бути виконані за допомогою нарядів, розпоряджень або в порядку поточної експлуатації, повинні піддаватися щорічному огляду і переутвердженню.

Процедура видавання та оформлення наряду включає наступні кроки:

1. Наряд на роботу складається у двох примірниках, і важливо, щоб записи в обох примірниках були чіткими і зрозумілими. Використання олівця, а також виправлення та перекреслювання тексту не допускається.

2. Наряд передається оперативному працівнику або працівнику, який готує робоче місце в електроустановках, якщо немає місцевої чергової обслуги, перед початком підготовки робочого місця.

3. Дозволяється передавати наряд по телефону працівником, який видав наряд, старшому оперативному працівнику електроустановки, зазначеної в наряді, або керівнику робіт. У цьому випадку наряд заповнюється в трьох

примірниках: один примірник заповнює працівник, який видав наряд, а два інших – працівник, який приймає його по телефону.

Один наряд видається для одного керівника робіт (наглядача), який керує однією бригадою. Таким керівникам робіт видається лише один наряд.

У випадку, коли необхідно виконати однотипні роботи, що передбачають роботу без відключення напруги і виконуються однією бригадою, може видаватися спільний наряд для виконання цих робіт в різних приєднаннях, на різних розподільних устаткуваннях (РУ) і в різних приміщеннях підстанцій. Оформлення переходу з одного робочого місця на інше обов'язкове лише у випадку переходу з одного РУ на інше або з одного поверху РУ на інший.

У електроустановках, де всі струмовідні частини відключені від напруги, включаючи виводи повітряних та кабельних ліній, і вхід до сусідньої електроустановки замкнутий (електрощити та розподільні пункти до 1000 В можуть залишатися під напругою), можна видавати один наряд для одночасної роботи на всіх приєднаннях.

У випадку розширення робочого місця або зміни кількості робочих місць слід видавати новий наряд.

При заміні керівника робіт або зміні складу бригади на більш як наполовину, також повинен бути виданий новий наряд.

Оперативні працівники, під час своєї черги та за згодою старшого в зміні оперативного працівника, можуть приймати участь у роботі ремонтної бригади без обов'язкового включення їх у наряд. Про це слід зазначати в оперативному журналі після проведеного спеціального інструктажу та підпису відповідального.

На робочій ділянці наряд видавати не можна на термін, що перевищує 15 календарних днів з моменту початку робіт.

На робочій ділянці можна продовжити наряд один раз, але на термін, що не перевищує 15 календарних днів з моменту продовження. Це право на продовження наряду може бути надане працівникові, який видав початковий

наряд, або іншому працівнику, який має відповідне право на видавання нарядів для робіт в даній електроустановці.

Система нумерації нарядів, їх реєстрація та зберігання регламентується письмовим розпорядженням особи, відповідальної за електрогосподарство. Наряди, після завершення робіт, повністю зберігаються протягом 30 днів.

Всі роботи, які виконуються в електрогосподарстві підприємства за нарядами та розпорядженнями, повинні бути обліковані в спеціальному журналі обліку робіт за нарядами і розпорядженнями. Форма цього журналу рекомендується використовувати згідно з додатком 5 [20].

У цьому журналі відображається початок і завершення первинного допуску до робіт згідно з нарядами, а також закінчення робіт; допуск до робіт, оформлений на підставі розпоряджень та його завершення (за винятком робіт, які виконуються оперативними працівниками або під їхнім наглядом, які реєструються лише в оперативному журналі). В цьому разі в журналі обліку зазначаються лише номер наряду та робоче місце.

Особа, яка несе відповідальність за електрогосподарство, має відповідати за ведення і зберігання журналу. Журнал повинен бути пронумерований, прошнурований і скріплений печаткою. Після останнього запису, журнал повинен зберігатися протягом 6 місяців.

Склад бригади, яка працює відповідно до наряду, визначається працівником, що видав наряд (або розпорядження). При визначенні складу бригади враховується кваліфікація та групи електробезпеки працівників, а також складність та умови виконання робіт. Метою є забезпечення безпеки та можливості нагляду за безпечним виконанням робіт всіма членами бригади з боку керівника робіт (наглядача). Зазвичай бригада повинна складатися з не менше двох працівників, включаючи керівника робіт.

В склад бригади, де на кожного члена припадає група III, можна включати одного працівника з групою I, але загальна кількість членів бригади з групою I не повинна перевищувати двох осіб.

Зміни в складі бригади може вносити працівник, що видав наряд, або інший працівник, який має право видавати наряди на виконання робіт в даній електроустановці. Інструкції щодо зміни складу бригади можуть бути передані по телефону виконавцю робіт або допускачеві, який записує прізвище та ініціали працівника, що вніс зміни, в наряді під своїм підписом.

Керівник робіт повинен надати інструкції працівникам, які були введені до складу бригади знову, стосовно заходів щодо безпечного проведення робіт.

Зміни в складі бригади повинні бути оформлені працівником, що видав наряд, а у випадку його відсутності - працівником, який має право видавати наряди на виконання робіт в даній електроустановці.

Підготовка робочого місця та допуск до виконання робіт

Для підготовки робочих місць та отримання допуску до виконання робіт необхідно отримати дозвіл від оперативних працівників або, у випадку відсутності таких працівників на підприємстві, від особи, яка видала наряд чи розпорядження, за узгодженням з особою, відповідальною за електрогосподарство.

Забороняється вносити зміни до запланованих заходів з підготовки робочих місць. Якщо виникають сумніви щодо належності та правильності зазначених заходів або можливості виконання робіт безпечно, підготовку слід зупинити.

Зазвичай підготовку робочих місць здійснюють два працівники, які мають право на оперативні перемикання в даній електроустановці. Також допускається залучення керівника робіт разом з одним із членів бригади до підготовки робочого місця, якщо вони мають відповідні права на оперативні перемикання в даній електроустановці.

Допуск до роботи з нарядами та розпорядженнями може бути здійснений лише на самому робочому місці. Зазвичай підготовку робочого місця виконує один працівник, за винятком випадків, коли необхідно встановити переносні заземлення в електроустановках з напругою понад

1000 В або здійснити перемикання на кількох приєднаннях в електроустановках понад 1000 В, де відсутні діючі пристрої блокування роз'єднувачів від помилкових дій.

Допускач разом з керівником робіт мають провести перевірку виконання технічних заходів щодо підготовки робочого місця. У випадках, коли керівник робіт також виконує обов'язки допускача, цю перевірку він проводить разом з одним з членів бригади, який має групу III з електробезпеки. Після цієї перевірки допуск до виконання робіт з нарядами та розпорядженнями надається на самому робочому місці після перевірки технічних заходів, що стосуються підготовки робочого місця.

В цьому випадку, допускач повинен виконати наступні кроки:

- Перевірити, чи відповідає склад бригади складу, зазначеному у наряді або розпорядженні, і переконатися, що у членів бригади є посвідчення про перевірку знань.

- Провести інструктаж для бригади, включаючи:
 - Ознайомлення бригади з вмістом наряду чи розпорядження.
 - Визначення меж робочого місця і шляхів доступу до нього.
 - Показ найближчого обладнання і струмовідних частин приєднань, які підлягають ремонту, а також суміжних частин, до яких заборонено наближатися, незалежно від того, чи знаходяться вони під напругою чи ні.

- Переконатися, що в місці роботи відсутня напруга, шляхом перевірки наявності заземлень і перевірки відсутності напруги. Якщо заземлення не видно з робочого місця, а в електроустановках з напругою 35 кВ і нижче (де це можливо за конструкцією) - з наступним дотиком рукою до струмовідних частин і подальшою перевіркою на наявність напруги.

Після інструктажу допускача, керівник робіт повинен провести інструктаж для бригади щодо безпечного виконання робіт, користування інструментами, пристосуваннями, механізмами та вантажопідіймальними

машинами. Проведення інструктажу є обов'язковим, і без нього заборонено виконувати роботу.

Проведення інструктажу та допуску до робіт оформлюються підписами допускателя і керівника робіт (наглядача) в таблиці 3 наряду, з вказівкою дати і часу проведення інструктажу. Допуск оформлюється в обох примірниках наряду: один примірник залишається у керівника робіт (наглядача), а інший - у допускателя. Якщо керівник робіт виконує обов'язки допускателя, допуск оформлюється в одному примірнику наряду.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі досліджено систему електропостачання та енергозбереження насосної станції зона II-A м.Кропивницький.

В роботі розглянуто особливості роботи насосної станції другого підйому, викладено вимоги до проектування насосних станцій, проаналізовано економічні показники роботи насосної станції. Дослідження системи електропостачання насосної станції враховувало характеристики споживачів.

Основну увагу в роботі було приділено системі заходів з енергозбереження насосної станції. Важливим чинником для підвищення ефективності роботи насосної станції є впровадження тиристорного перетворювача напруги для насосних агрегатів та автоматизація технологічних процесів насосних станцій, що детально розглядалися в магістерській роботі.

Також у роботі були проведені дослідження системи регульованого електроприводу насосних агрегатів, включаючи моделювання роботи асинхронних двигунів насосної станції з використанням перетворювача частоти. Крім того, було здійснено оцінку економічної вигоди від впровадження перетворювачів частоти, розрахована річна економія енергоресурсів та термін окупності устаткування. Встановлено, що використання перетворювача частоти суттєво знижує і витрати, пов'язані з обслуговуванням агрегатів і систем

У розділі щодо охорони праці розглянуто безпечну експлуатацію системи електропостачання насосних станцій.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
3. Електричні машини. Проектування асинхронних машин: метод. вказ. до виконання курс. проекту з навч. дисц. «Електричні машини» для студ. 3 курсу ден. та заочн. форм навч. спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / [уклад.: П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, О. А. Козловський] ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 125 с.
4. Плешков С. П. Енергоефективний електропривод у промисловості та сільськогосподарському виробництві: навч. посіб. для галузі знань 14 «Електрична інженерія» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / С. П. Плешков, С. В. Серебренніков; М-во освіти і науки України, Кіровоград. нац. техн. ун-т – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2016.– 161 с.
5. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград : КНТУ, 2015. – 287 с.
6. Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій : навчальний посібник / В. О. Панченко, В. Ф. Герман, О. В. Івченко та ін. ; за загальною редакцією В. О. Панченка. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 270 с.

7. Насосні та повітродувні станції : навч. посібник / Т. О. Шевченко, Ю. В. Ярошенко, М. М. Яковенко, В. М. Беляєва ; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Х. : ХНУМГ, 2014. – 191 с.
8. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.
9. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл
10. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с
11. Енергозбереження в технологічних установках. Навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 7.000008, 7.000008 “Енергетичний менеджмент” (денної і заочної форм навчання) / Укл.: Ю.Г. Качан, А.Г. Лохматов – Запоріжжя, 2010. – 118 с.
12. Лавріненко Ю.М. Основи електропривода: підручник / Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.В. Савченко, І.М. Голодний. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 524 с.
13. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков. – Київ: Либідь, 2005. – 680 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. 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.