

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні

(назва факультету)

Кафедра електротехніки та енергоефективності

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

рівень вищої освіти

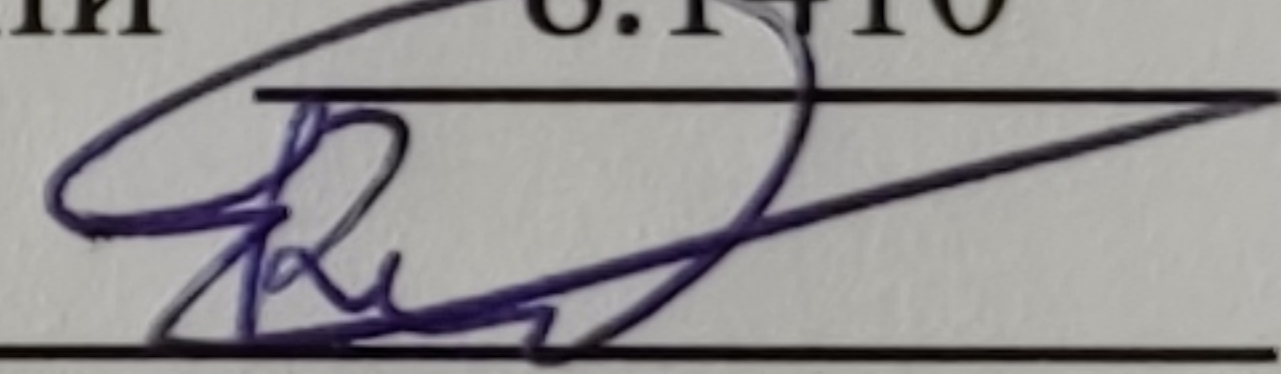
другий (магістерський) рівень

на тему Підвищення ефективності електроспоживання обладнання
насосної станції ТОВ «Автоміськбуд», м. Дніпро

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1410

Кондратенко Д.А.

(прізвище та ініціали)


(підпис)

спеціальність

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма

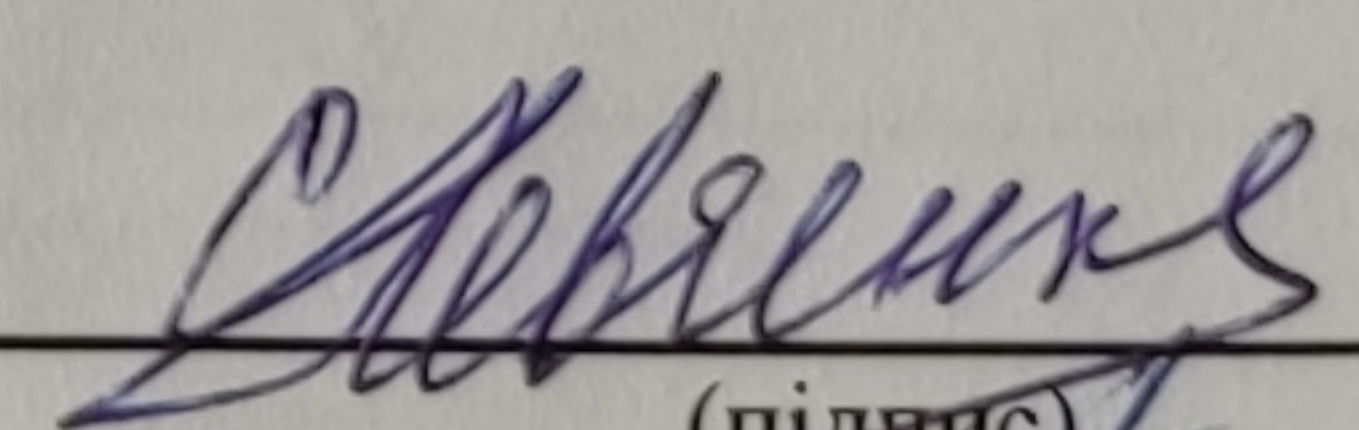
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Керівник

Левченко С.А.

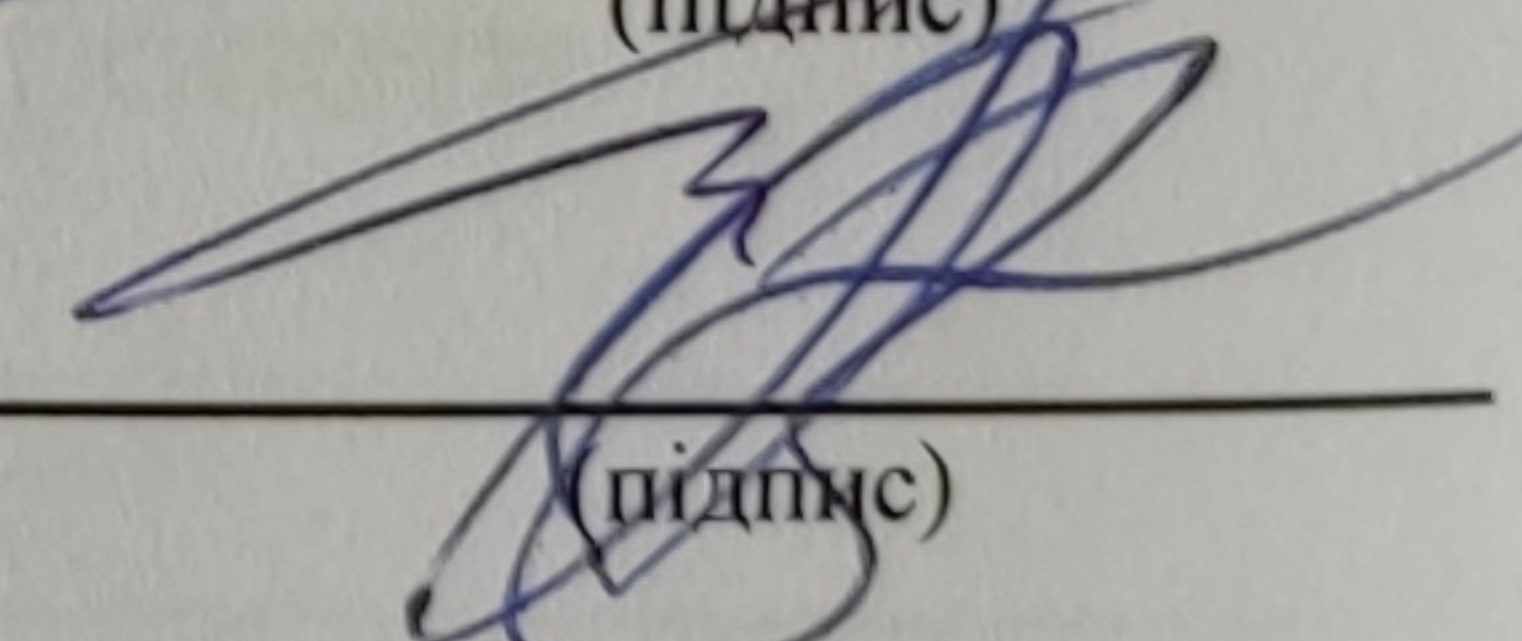
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Рецензент

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали)


(підпис)

Факультет Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(повна назва факультету)

Кафедра електротехніки та енергоефективності
(повна назва кафедри)

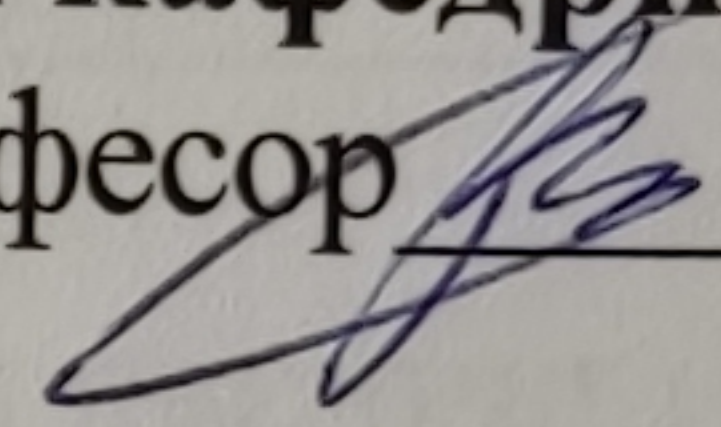
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва)
електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., професор  В.Л. Коваленко

“ 14 ” 12 2021 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кондратенко Данилу Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи магістра Підвищення ефективності
електроспоживання обладнання насосної станції ТОВ «Автоміськбуд», м. Дніпро
керівник бакалаврської роботи Левченко С.А, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від « 30 » 06 2021 року № 974-С

2. Строк подання студентом роботи 01 грудня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи середній тариф за 1 кВт·год. електроенергії –

поточний; загальна потужність електродвигунів – 250 кВт; час роботи
двигунів – 3350 год/рік.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Вступ. Загальна характеристика ТОВ «Автоміськбуд». Аналіз роботи асинхронних
двигунів в електроприводах насосних агрегатів. Особливості роботи насосних
агрегатів. Техніко-економічне обґрунтування впровадження частотно-

регульованого електроприводу

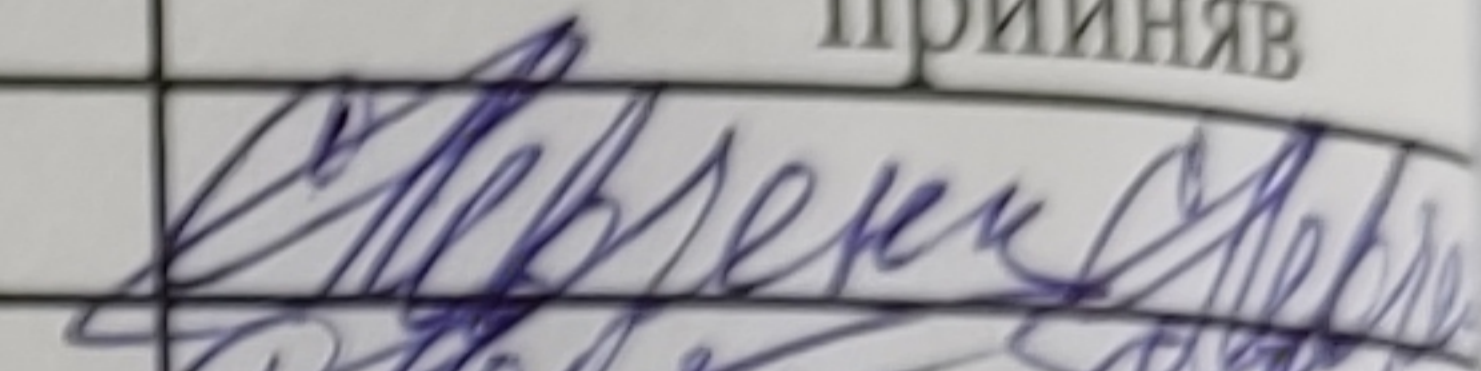
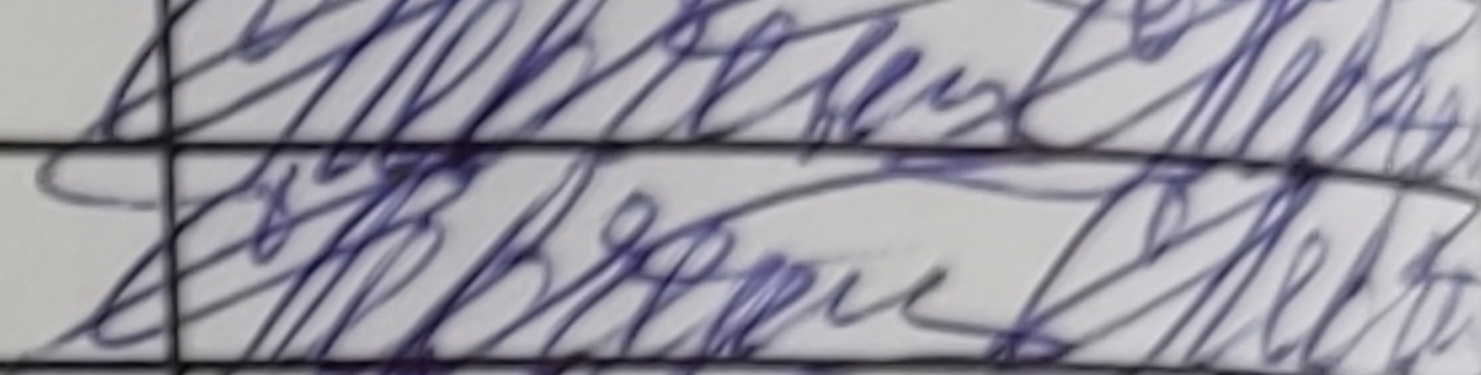
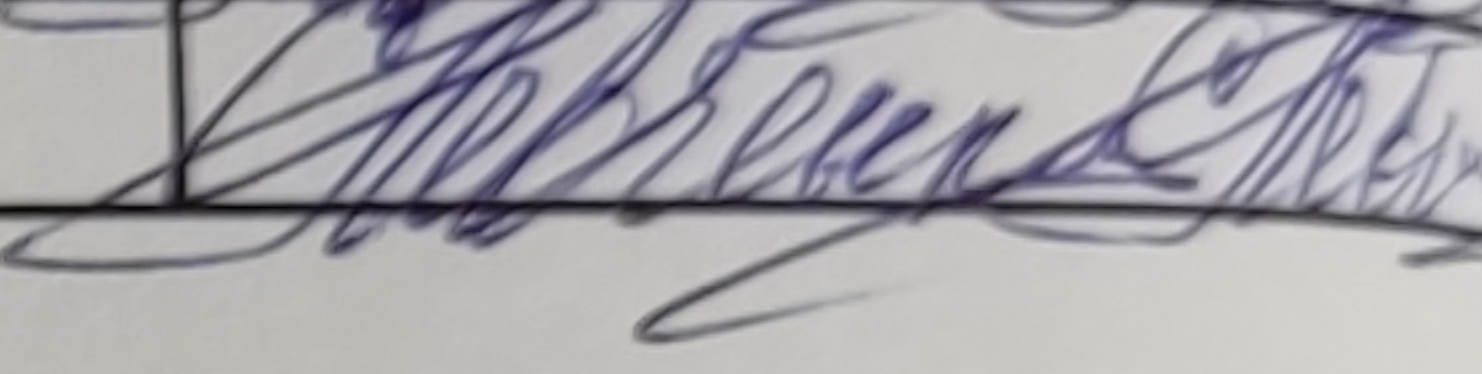
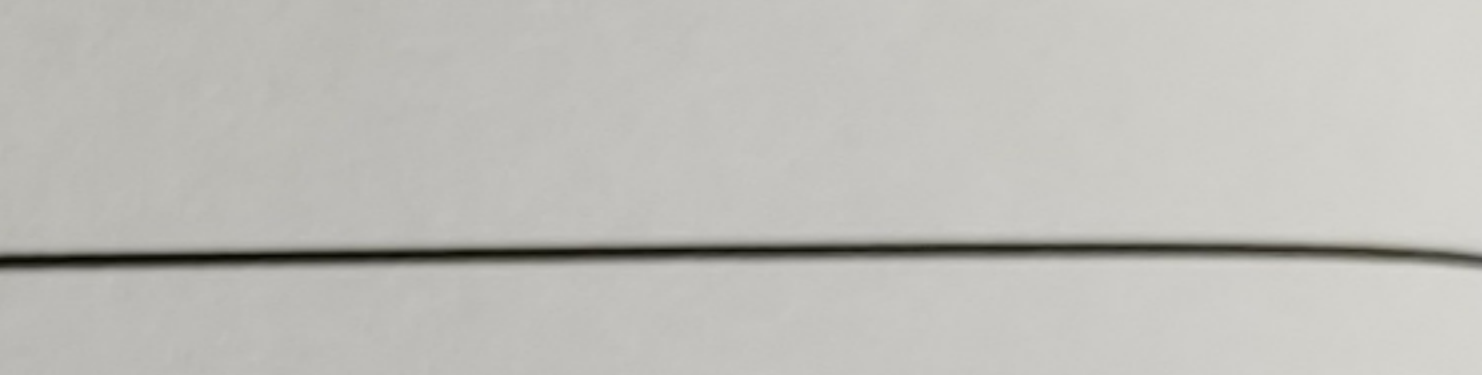
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Основні функції служби головного інженера. Споживання електроенергії насосною станцією за 2020 рік. Режим роботи насосного агрегату.

Цикл навантаження і особливості роботи насосних агрегатів.

Аналіз ефективності роботи РЕП

6. Консультанти розділів бакалаврської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Розділ 1	Левченко С.А., доцент	
Розділ 2	Левченко С.А., доцент	
Розділ 3	Левченко С.А., доцент	
Розділ 4	Левченко С.А., доцент	

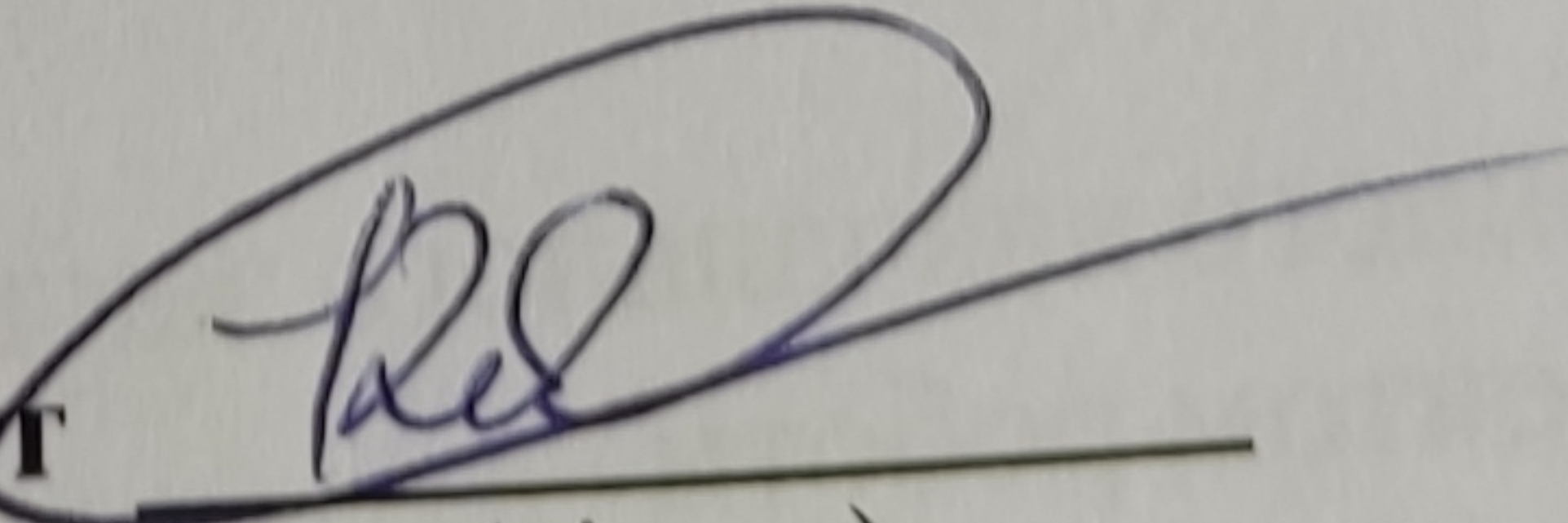
7. Дата видачі завдання

01.09.2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

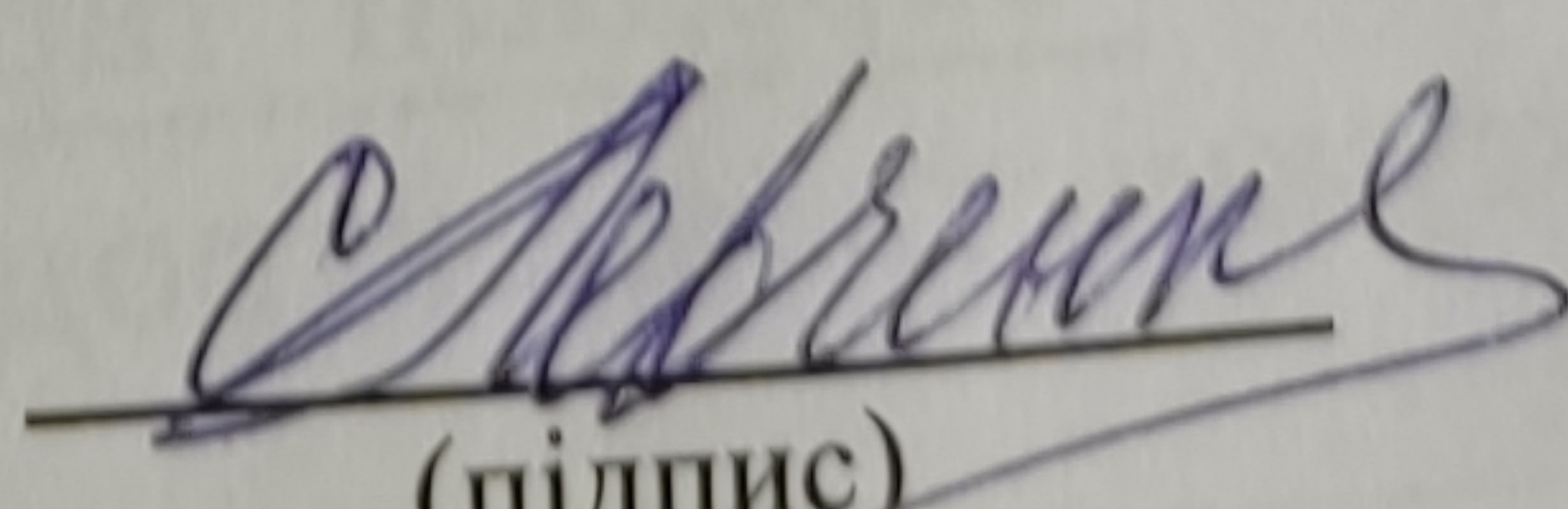
№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим
1	Загальна характеристика ТОВ «Автомісьбуд»	30.09.2021	
2	Аналіз роботи асинхронних двигунів в електроприводах насосних агрегатів	30.10.2021	
3	Особливості роботи насосних агрегатів	19.11.2021	
4	Техніко-економічне обґрунтування впровадження частотно-регульованого електроприводу	30.11.2021	

Студент


(підпис)

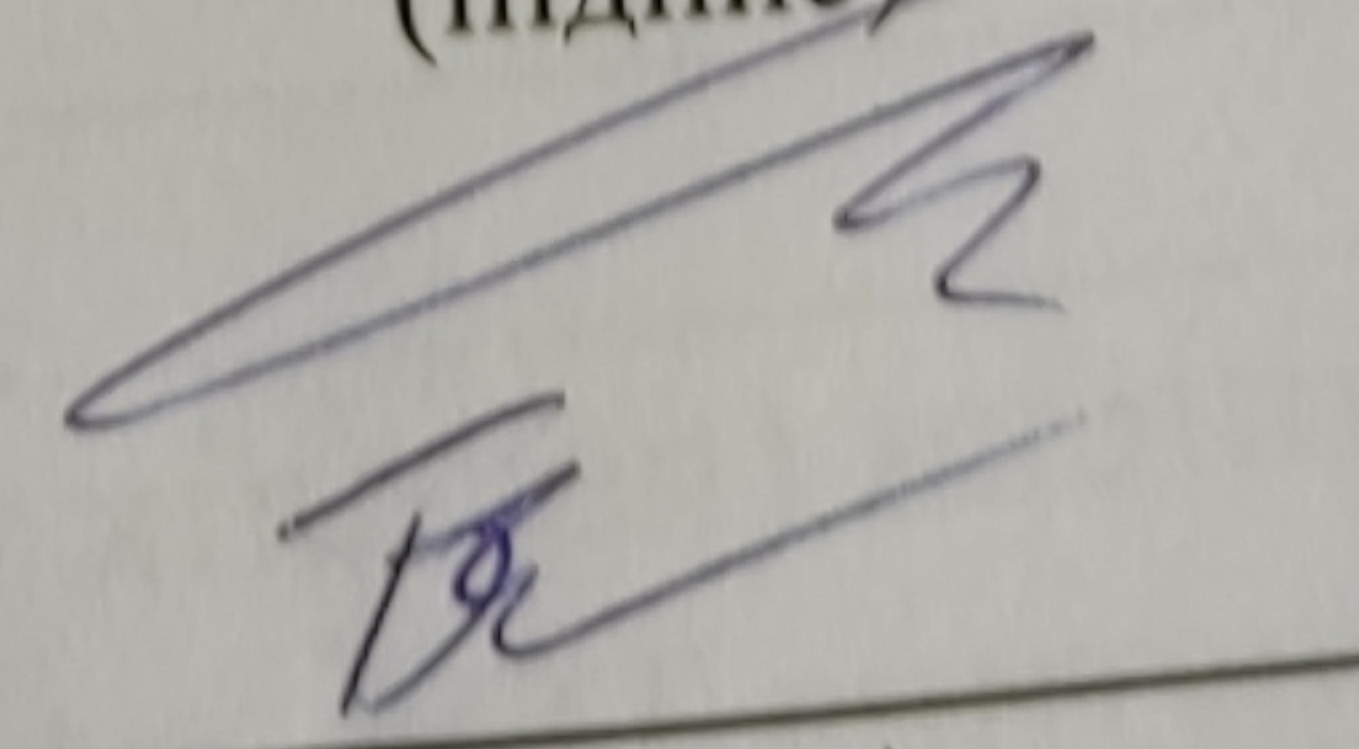
Кондратенко Д.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи


(підпис)

Левченко С.А.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль здійснив


(підпис)

Башлій С. В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кондратенко Д.А. Підвищення ефективності електроспоживання обладнання насосної станції ТОВ «Автоміськбуд», м. Дніпро.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник к.т.н., доцент С.А. Левченко, Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні, кафедра електротехніки та енергоефективності. Запоріжжя, 2021.

У роботі виконано комплекс досліджень, спрямованих на модернізацію насосних агрегатів шляхом використання регульованого електропривода. Запропоновано заходи для підвищення енергоефективності насосних станцій.

Ключові слова: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН.

ABSTRACT

Kondratenko DA Improving the efficiency of electricity consumption of the pumping station equipment of Avtomiskbud LLC, Dnipro.

Qualification work of the master for higher education in the specialty 141 - electric power, electrical engineering and electromechanics, supervisor Ph.D., associate professor SA Levchenko, Zaporizhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny, Department of Electrical Engineering and Energy Efficiency. Zaporozhye, 2021.

A set of researches aimed at modernization of pump units by using an adjustable electric drive is performed in the work. Measures to improve the energy efficiency of pumping stations are proposed.

Key words: ENERGY EFFICIENCY, ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, ASYNCHRONOUS MOTOR.

АННОТАЦИЯ

Кондратенко Д.А. Повышение эффективности электропотребления оборудования насосной станции ООО "Автогорстрой", г. Днепр.

Квалификационная работа магистра на соискание высшего образования по специальности 141 – электроэнергетика, электротехника и электромеханика, научный руководитель к.т.н., доцент С.А. Левченко, Запорожский национальный университет, Инженерный учебно-научный институт им. Ю. М. Потебни, кафедра электротехники и энергоэффективности. Запорожье, 2021.

В работе выполнен комплекс исследований, направленных на модернизацию насосных агрегатов путём использования регулируемого электропривода. Предложены меры по повышению энергоэффективности насосных станций.

Ключевые слова: ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Загальна характеристика ТОВ «Автоміськбуд», м. Дніпро	Error! Bookmark not defined.
2 Аналіз роботи асинхронних двигунів в електроприводах насосних агрегатів.....	19
2.1 Робота насосних агрегатів. Аналіз характеристик	19
2.2 Аналіз роботи регульованого електроприводу з асинхронними двигунами.....	24
2.3 Вплив законів регулювання в електроприводі на ефективність роботи асинхронних двигунів.....	28
3 Особливості роботи насосних агрегатів	34
3.1 Електропривод з регулюванням напруги статора АД.....	43
4 Техніко-економічне обґрунтування впровадження частотно-регульованого електроприводу.....	49
4.1 Оцінка ефективності впровадження частотно-регульованого електроприводу	49
4.2 Питання, пов'язані з охороною праці	
Висновки	69
Перелік посилань.....	71
Додатки.....	74

ВСТУП

Актуальність теми. Енергозбереження та енергоефективність є надважливим питанням фактично у всіх галузях народного господарства. Це ж стосується і комунального господарства. Однією з ланок комунального господарства є автомобільний цех, частиною чого є система водопостачання. Як показав аналіз, енергетичні витрати водопостачання виявилися суттєвими. Так, найбільшими споживачами електричної енергії у водному господарстві є насосні агрегати. На даний час насосні агрегати мають нерегульований привод, що відкриває широкі можливості для енергозбереження. У той же час неефективне використання паливно-енергетичних ресурсів є деструктивним, яке не дозволяє розвиватись будь-якому підприємству. Тому одним із напрямків розвитку енергетичної складової підприємств є підвищення енергоефективності електроприводу з використанням асинхронних двигунів. Удосконалення конструктивних елементів та управління електроприводів дозволить зменшити витрати споживаної електроенергії.

Метою магістерської роботи є визначення раціонального регулювання обертів електроприводу насосних агрегатів системи водопостачання.

Для досягнення вказаної мети поставлені такі основні задачі:

- провести аналіз споживання електричної енергії насосними станціями;
- проаналізувати способи регулювання обертів електроприводу;
- визначити доцільний метод регулювання частоти обертів АД електроприводів;
- провести техніко-економічне обґрунтування розроблених заходів з підвищення енергоефективності електроприводу.

Об'єкт дослідження – електропривод насосних агрегатів на основі асинхронного двигуна.

Предмет дослідження – процеси, що відбуваються в електроприводі насосних установок.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТОВ «АВТОМІСЬКБУД», М. ДНІПРО

Підприємство ТОВ «Автоміськбуд» має ділянки з виробничими спорудами, з адміністративними, побутовими та допоміжними спорудами, а також складські приміщення. Особливістю структури даного підприємства є групування підрозділів для мінімізації кількості персоналу. Так, до технічного відділу входять підрозділи головного енергетика, виробничий підрозділ, підрозділ матеріально-технічного забезпечення.

Відповідно до вище переліченого, служба головного інженера здійснює такі основні функції (рис. 1.1):



Рисунок 1.1 – Основні функції служби головного інженера

У службі бухгалтерського обліку всі операції виконуються із застосуванням сучасних інформаційних технологій та займається повним документуванням всіх господарських операцій, відображенням їх у відповідних реєстрах бухгалтерського обліку, веде контроль за використанням коштів у підвідомчих міжрайонних управліннях водного господарства. Складає та подає у відповідні інстанції зведену фінансову та статистичну звітність. Всі етапи бухгалтерського обліку та звітності автоматизовані, в тому числі нарахування та виплата заробітної плати, звітування перед Державною податковою службою, пенсійним фондом і т.д.

На території підприємства працюють компресорна станція для забезпечення виробництва стисненим повітрям та насосна станція для забезпечення водою з необхідним напором води. Особливістю даного підприємства є те, що воно було створено на площах підкачуючої станції, тому окрім своєї виробничої діяльності дане підприємство займалось водопостачанням частини Новокодацького району. Фактично, спочатку це була насосна станція, на базі якої з'явилося зазначене товариство з додатковими видами діяльності. Потужність водозаборів становить понад ста тисяч метрів кубічних на добу. Споруди 1-го підйому служать для забору води та подачі її через водоводи споживачам. Споживачами води є населення і підприємства. До складу водозабірних споруд 1-го підйому входять: опускні оголовки, затопленого типу, всмоктувальні водоводи, насосні станції 1-го підйому № 1 і № 2 і магістральні водоводи. Водозабірні споруди: ківш відкритий площею 0,06 км², огорожений від річки дамбою. У ковші є водоприймальні споруди, які складаються з 2 - х водозабірних колодязів, самопливних і сифонних ліній; колодязь №1 (водоприймальний оголовок). Дерев'яний ряж, завантажений бутовим фільтруючим каменем. Перекриття знімні сталеві, направляючі рами з

накладними металевими частинами, обсипання ряжа каменем із зовнішнього боку; колодязь №2 (водоприймальний оголовок). Дерев'яний ряж, завантажений бутовим фільтруючим каменем. Перекриття знімні сталеві, направляючі рами з накладними металевими частинами, обсипання ряжа каменем із зовнішнього боку; три прийомні камери для забору води насосами від 1-го підйому насосної станції; від забірних споруд вода надходить в береговий колодязь №1 по трубах $d = 900$ мм. і по сифон трубопроводу $d = 1200$ мм.; від колодязя № 2 в ковші проходить самопливний трубопровід $d = 600$ мм до берегового колодязя № 2; береговий колодязь №1 круглий $d = 8,5$ м., залізобетонний, стіни цегляні, глибина колодязя – 12 м.; береговий колодязь №2 круглий $d = 7,1$ м, залізобетонний, опускного типу, стіни цегляні, глибина колодязя - 10,5 м.

Вода з берегових колодязів надходить в насосну станцію 1-го підйому (в старий машинний зал) по трубопроводах $d = 600$ мм і $d = 800$ мм. На насосній станції 1 підйому насоси типу Д 630-90 і Д 320-50 встановлюються одразу після всмоктувальних камер, де вода надходить вже без великих тіл [1]. Напір створюваний водозабірним насосом вибирається залежно від необхідного напору у споживача і опором мережі. Вода по чотирьом вводам через засувки надходить у колектор.

На майданчику насосної станції 2-го підйому розташовані 2 водонапірні басейни по 100000 м³ кожний, басейни мають рециркуляційну систему, 3 насосні станції 2-го підйому з встановленими насосами типу Д 320-50, 7 камер переключень. Вода перед подачею споживачам 1 групи проходить обробку на водопровідних очисних спорудах, що включають в себе 10 фільтрів, на яких відбувається очищення води від великих і дрібних частинок. Технічна водана північну частину подається насосною станцією № 2, на південну частину насосною станцією № 3. Водопостачання на території населених пунктів

здійснюється насосною станцією 3-го підйому. Загальна протяжність мереж водопостачання трубопроводів різних діаметрів становить 160 кілометрів. Діаметр трубопроводів складає від 100 до 500 мм, довжина ділянок від 10 до 50 км, матеріал – метал, на деяких ділянках застосований полімер у зв'язку із заміною аварійно зношених труб.

Характеристика силового обладнання. На даний час в насосній станції є чотири насосних групи в залежності від призначення рідини: водозабірні, допоміжні, дренажні, перекачуючи. Встановлено насоси двох видів: консольні відцентрові типу К і одноступінчасті насоси типу Д. Водозабірна група насосів з тиском 8 кг/см² вода надходить в загальний колектор, звідки по трубопроводах входу частина води надходить в напірний басейн, а частина - через регулятор перепуску в подаючу магістраль [2]. Насоси всі встановленні одноступінчасті горизонтальні з двосторонньою подачею рідини, характеристика наведено нижче.

Тип насосної групи Д-630-90:

- потужність 250 кВт;
- напір 90 м³;
- продуктивність 630 м³/год;
- ККД 0,82;
- частота обертів 1450 об/хв.

Тип насосної групи Д-320-50:

- потужність 75 кВт;
- напір 50 м³;
- продуктивність 320 м³/год;
- ККД 0,80;
- частота обертів 1450 об/хв.

Допоміжна група [1, 2] призначена для заповнення водою систему під час

пуску водозабірних насосів, водяного змащення підшипників напрямних і сальникових ущільнень насосів, а також до теплообмінникам допоміжного обладнання (компресорів, великих електродвигунів). Підживлення здійснюється допоміжними насосами типу "К"- відцентрові, консольні, одноступінчаті з одностороннім підведенням рідини до робочого колеса, призначені для перекачування води виробничо-технічного призначення, технічна характеристика наведена нижче.

Тип насосної групи К-90/35:

- потужність 15 кВт;
- напір 35 м;
- продуктивність 90 м³/год;
- ККД 0,77;
- частота обертів 2950 об/хв.

Тип насосної групи КС-12-50:

- потужність 5,5 кВт;
- напір 60 м;
- продуктивність 12 м³/год;
- ККД 0,80;
- частота обертів 3000 об/хв.

Згідно [1, 2] дренажна група насосів встановлена в підвалі насосної, для відкачування води з дренажної ями для скидання її в каналізацію. Насоси типу "К"- відцентрові, консольні, одноступінчаті з одностороннім підведенням рідини до робочого колеса. Технічна характеристика дренажної групи насосів:

Тип насосної групи 4К-8:

- потужність 19 кВт;
- напір 50 м;

- продуктивність 100 м³/год;
- ККД 0,70;
- частота обертів 2900 об/хв.

Згідно [2, 3] перекачуюча група насосів потрібна для підвищення тиску при подачі води на далеку відстань. Завдання цієї групи: наповнення водонапірних басейнів та зняття навантаження з водозабірної групи. Встановлені насоси одноступінчасті відцентрові двосторонні типу Д, технічна характеристика наведена нижче:

Тип насосної групи Д-320-50:

- потужність 75 кВт;
- напір 50 м;
- продуктивність 320 м³/год;
- ККД 0,80;
- частота обертів 1450 об/хв.

Аналіз енергетичної складової витрат. Система електропостачання насосної станції – магістральна. Розподільні пристрої (РП) призначені для прийому, розподілу й обліку електричної енергії напругою 380/220 В трифазного змінного струму частотою 50 Гц в мережах з системою заземлення – TN-C, TN-S, TN-C-S, для захисту ліній при перевантаженнях і коротких замиканнях. Усе електрообладнання живиться по двом секціям, перша секція (водозабірні та перекачуючи насоси) живиться від фідера №8 та друга секція (допоміжні, дренажні) від фідера №24. РП-0,4 кВ і є низьковольтною складовою підстанції і може використовуватися для побудови всіх типів головних, вторинних і кінцевих низьковольтних розподільних щитів, розрахованих на струми до 4000 А. Живлення РП – 0,4 кВ здійснюється від трансформаторів типу ТМ- 1000. Трансформатори серії ТМ-1000 являються стаціонарними, силовими, масляними,

понижуючими, трифазними, двох обмотувальними, загального призначення. Встановили для перетворення електроенергію одного класу напруги в інший і живити різні споживачі електроенергії. Трансформатори масляні серій ТМ -1000 призначені для роботи в електромережах напругою 6 або 10 кВ у відкритих електроустановках в умовах помірного клімату (виконання У1 по ГОСТ 15150-69) і служать для зниження високої напруги живильної електромережі до встановленого рівня споживання. Баки трансформаторів типу ТМ прямокутної форми. Трансформатори виготовляються з гофрованими баками. Активна частина складається з магнітопроводу, виготовленого з холоднокатаної електротехнічної сталі, обмоток і високовольтного перемикача. Обмотки трансформаторів алюмінієві або мідні. Введення ВН і НН зовнішньої установки, знімні, ізолятори прохідні фарфорові. Маслорозширювач забезпечує наявність масла при всіх режимах роботи трансформатора і коливаннях температури навколишнього середовища. Трансформатори ТМ-1000 випускаються з номінальною напругою первинної обмотки (високої напруги) до 10 кВ включно і вторинної обмотки (низької напруги) – 0,4 кВ. Обидві секції ставляться під напругу через кабельні роз'єднувачі типу РВЗ - 6/600 і шинні роз'єднувачі типу РВ-6/400. Між секціями зібрана схема АВР на двох секційних роз'єднувачах типу РВ-6/400. Кабельна лінія від ТП - 1330 в бік ТП-571 є резервною.

Живлення водозабірних насосів проводиться через шинні роз'єднувачі типу РВ-6/400 і вакуумні вимикачі з РУ-6 кВ. Живлення РУ-0,4 кВ здійснюється від двох силових трансформаторів типу ТМ -1000 через автомати типу АВМ-15 та роз'єднувачі Р-2515 на дві секції шин РУ-0,4. Живлення водозабірних насосів проводиться через шинні роз'єднувачі типу РВ-6/400 і вакуумні вимикачі з РП-6 кВ. Живлення РП-0,4 кВ здійснюється від двох силових трансформаторів типу ТМ-1000 через автомати типу АВМ-15 та роз'єднувачі Р-2515 на дві секції шин

РП-0,4. Струм змінний (для основних споживачів) і постійний (для зв'язку та сигналізації). Основними споживачами електроенергії є електричні двигуни насосів, прилади електроосвітлення, а також автоматика регулювання та безпеки. Помісячне споживання електроенергії за 2020 рік наведено на рисунку 1.2.

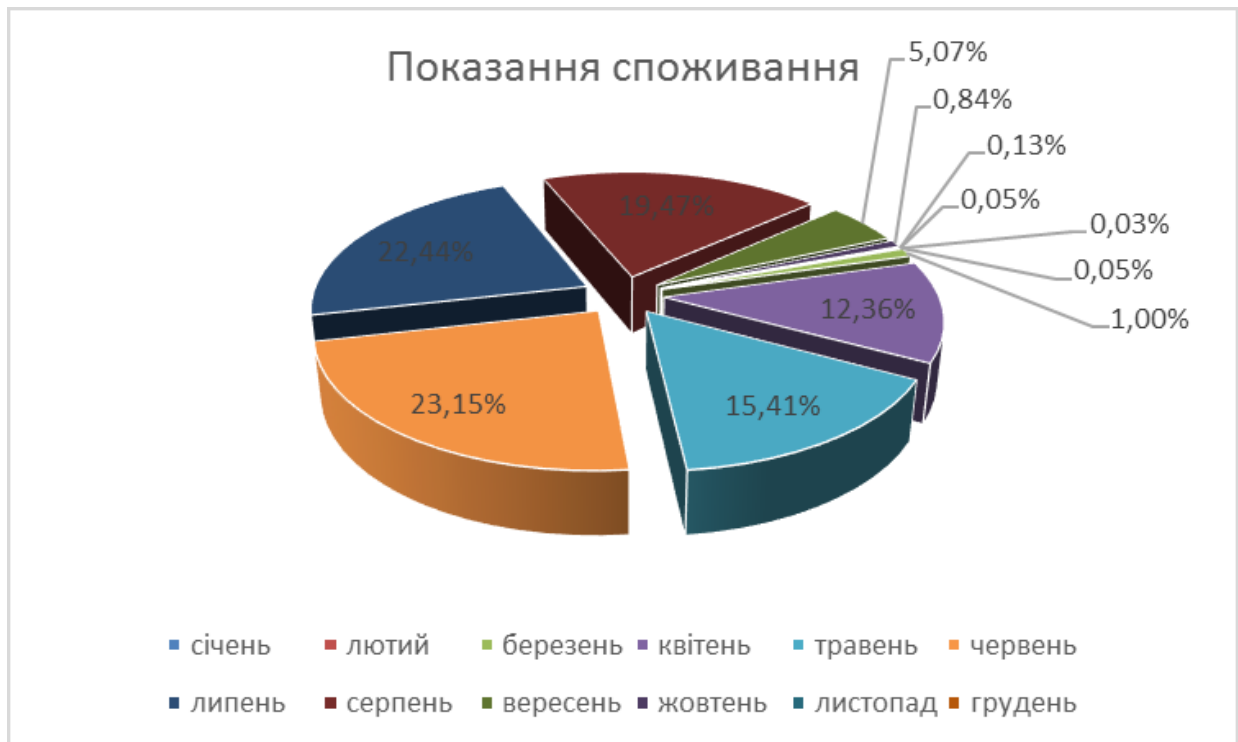


Рисунок 1.2 – Споживання електроенергії за 2020 р.

Значення коефіцієнтів попиту і використання максимального навантаження, а так само розрахункове число годин роботи машин на рік представлені у таблиці 1.1 та рисунку 1.3.

Таблиця 1.1 – Розрахунок витрат електроенергії обладнанням насосної

№	Найменування обладнання	Потужність, кВт	Кількість, шт/год	Час роботи, год	Коефіцієнт використання	Річне споживання, кВт
Насосне обладнання						
1	Водозабірні Д-630-90	250	4	4350	0,70	3045125
2	Водозабірні Д-320-50	75	2	4200	0,70	442050
3	Допоміжні К-90/35	15	2	5304	0,70	111473
4	Допоміжні КС-12-50	5,5	1	900	0,70	3528
5	Перекачуючи Д 320/50а	55	3	3865	0,70	446419
6	Дренажні 4К-8	18	3	5432	0,70	205410
Освітлення насосної станції						
7	ДРЛ - 125	1,25	54	3600	0,80	295512

Аналіз споживання електроенергії на насосній станції показує, що найбільшими споживачами є насосні агрегати водозабірної групи (82 %); перекачуюча група споживає до 10,4 %; дренажна група споживає близько 5 %; допоміжна коло 2 %; а на освітлення витрачається близько 1 %.



Рисунок 1.3 – Витрати електричної енергії на насосній станції за 2020 рік

2 АНАЛІЗ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

2.1 Робота насосних агрегатів. Аналіз характеристик

Механічна характеристика електроприводу насосного агрегату є основною характеристикою, на основі якої ведеться розрахунок робочої точки при різних частотах обертання. На рисунку 2.1 представлені характеристики трубопроводу при наступних значеннях $H_{ст} = 0$, $H_{ст1} = 0,25H_n$, $H_{ст2} = 0,5H_n$, $H_{ст3} = 0,15H_n$. Розглянемо отримання механічної характеристики насосного агрегату на прикладі насосного агрегату К160/20а. Характеристики насоса (рис. 2.1), що показують взаємозалежність напору H , подачі Q , потужності P_n насоса при номінальній частоті обертання двигуна $n_n = 1450$ об/хв визначені по каталогу [8].

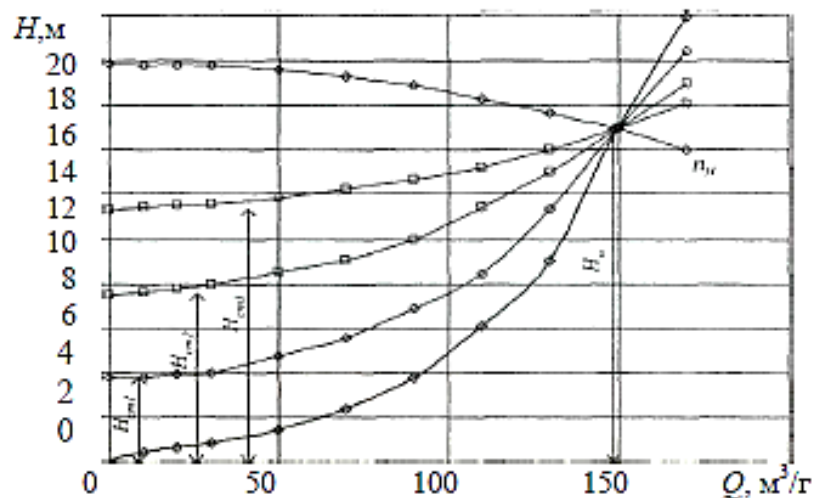


Рисунок 2.1 – Графік роботи насосного агрегату К 160/20а та трубопроводу [9]

Як вже зазначалось вище, однією з основних особливостей насосних агрегатів, становить механічна характеристика – $M_c = f(n)$, причому механічні характеристики насосного агрегату носять вентиляторний характер. Як було

зазначено вище, на характер механічної характеристики істотно впливає вид характеристики мережі, а саме співвідношення між статичної та динамічної складовими необхідного напору. Механічна характеристика насосного агрегату може бути отримана при спільному аналізі характеристик трубопроводу і насосного агрегату при різних частотах обертання АД. Вид механічної характеристики залежить також від величини $H_{ст}$. Момент опору насосного агрегату визначається відповідно до виразу:

$$M_c = 9,565 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_n \cdot n},$$

де ρ – щільність рідини, що перекачується, в нашому випадку води;

g – прискорення вільного падіння;

η_n – ККД насосного агрегату.

Трубопровід має характеристику з постійними параметрами і характеризується втратами напору на внутрішнє тертя, тертя потоку об стінки робочої мережі і на подолання місцевих опорів пропорційних квадрату швидкості потоку або пропорційних квадрату продуктивності насоса. Величина коефіцієнта опору мережі залежить від протяжності мережі, поперечного перерізу трубопроводу, і в'язкості рідини, шорсткості стінок трубопроводу, від наявності додаткових опорів (колін, зворотних клапанів, засувок та інших елементів конструкцій). Характеристика насоса для номінальної частоти обертання, отримана з довідкових даних, може бути перерахована для будь-якої частоти обертання за формулами подібності [4 - 6], тоді характеристики насоса при зміні частоти обертання можуть бути представлені у вигляді:

$$H = H_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + Q^2 \frac{H_0 - H_n}{Q_n^2},$$

де n_n – номінальна частота обертання механізму;

H_0 – статичний напір, створюваний при номінальній частоті обертання і продуктивності рівній нулю;

H_n – номінальний напір насоса;

Q_n – номінальний витрата насоса.

Характеристики насосного агрегату одержувані при зміні частоти обертання, а також характеристика трубопроводу при $H_{ст2} = 0,5H_n$ представлені на рисунку 2.2. Точки перетину даних характеристик визначають робочі точки насосного агрегату.

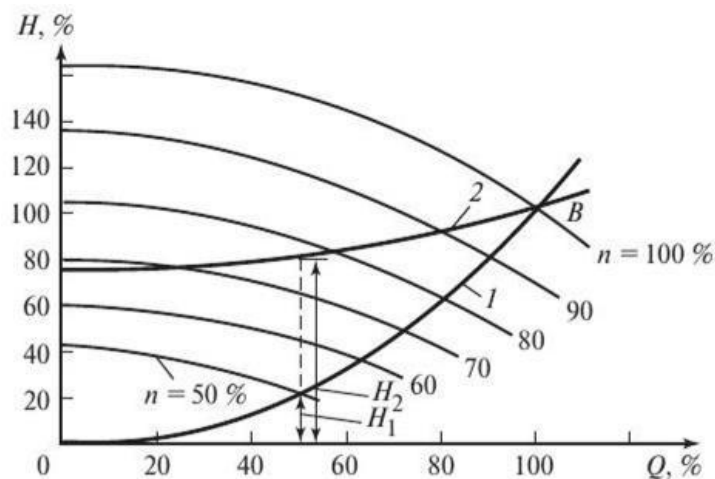


Рисунок 2.2 – Характеристики насосного агрегату К 160/20а та трубопроводу при зміні частоти обертання [8]

Момент опору насосного агрегату у загальному випадку визначається відповідно до виразу [14]:

$$M_c = 9,565 \frac{P_n}{n}$$

Потужність насосного агрегату визначається з каталожних даних шляхом перерахунку за допомогою формул подібності. Знаючи робочі значення витрати води насосного агрегату, графічним способом можна визначити чисельні значення потужності, споживаної насосним агрегатом [12]. Використовуючи зазначену вище формулу може бути визначено момент опору або механічна характеристика насосного агрегату. Для насосів характерна залежність моменту опору на валу від швидкості, оскільки насоси зазвичай працюють на протитиск, то ця залежність більш різка, ніж квадратична, характер залежностей представлений на рисунку 2.3 [8].

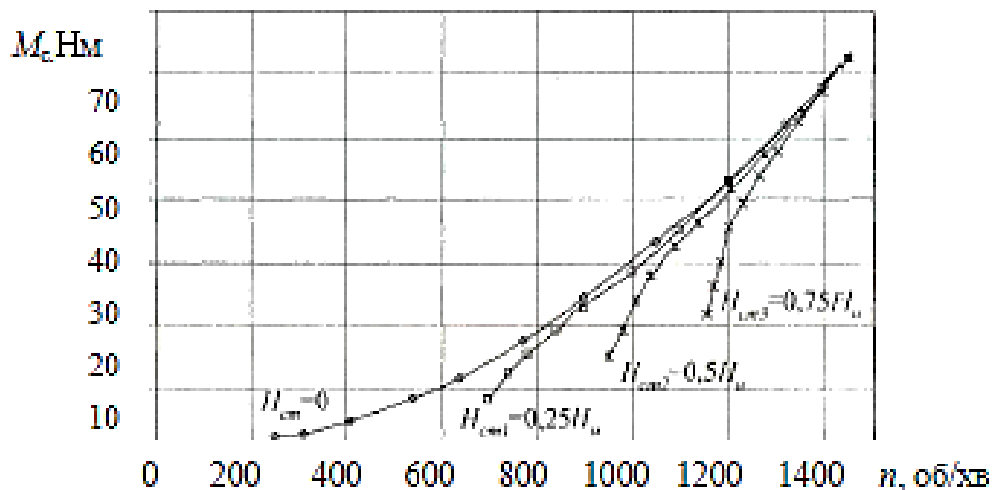


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики насосного агрегату К 160/20а при різних значеннях статичної складової напору [8]

Аналitiчну залежність можна отримати, використовуючи апроксимуючу характеристику насосного агрегату. При регулюванні швидкості від нуля до мінімальної залежність носить квадратичний характер, потім коли насос розвине натиск, достатній для подолання статичного напору, характер залежності $M_c = f(n)$ змінюється і залежить від величини статичної складової напору [13]. Як стає зрозуміло з рисунку 2.3 механічні характеристики багато в чому залежать від

величини статичної складової напору, а також від виду характеристики трубопроводу, у випадку з насосним агрегатом залежність виявляється більш складною. Однак при роботі системи на підтримку постійного значення напору $H = H_n = \text{const}$ в мережі механічна характеристика насосного агрегату виявляється відмінною від отриманих вище характеристик. На рисунку 2.4 показана механічна характеристика насосного агрегату, як навантажувальної машини асинхронного двигуна при підтримці постійного напору $H = H_n = \text{const}$ при $H_{ст2} = 0,5H_n$.

Аналіз механічних характеристик показує, що в міру зростання статичної складової напору скорочується діапазон регулювання, при зниженні швидкості момент зменшується інтенсивніше, ніж це визначалося квадратичною залежністю (рис. 2.3) [9].

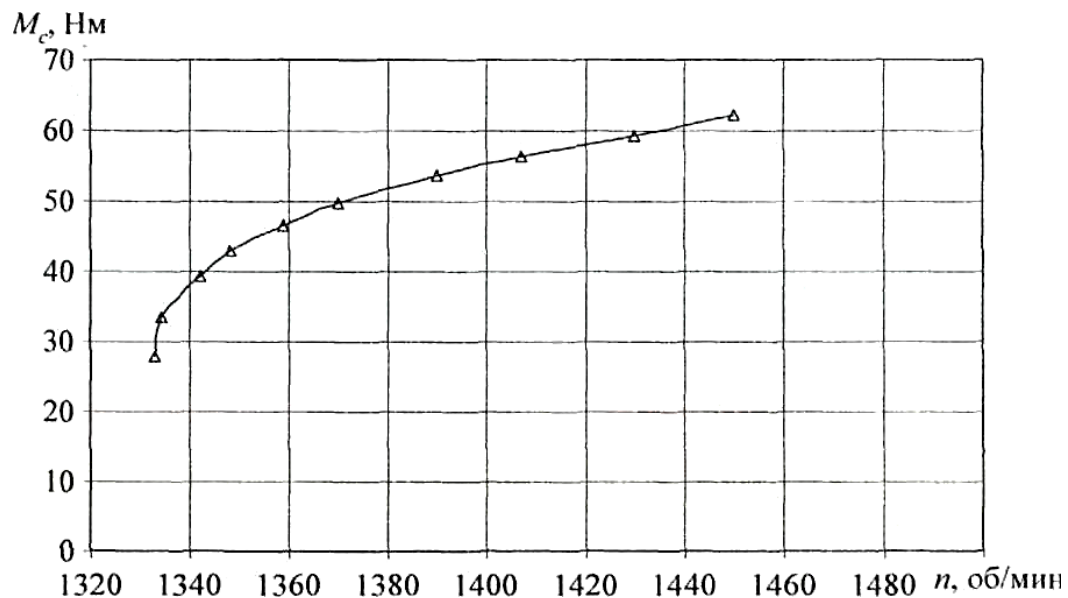


Рисунок 2.3 – Механічна характеристика насосного агрегату [9]

Таким чином, можна зробити висновок, що неприпустимо визначати робочі параметри насосів просто шляхом використання формул подібності, розрахунок механічних характеристик повинен проводитися з урахуванням реального режиму роботи насосної установки. Механічна характеристика насосного агрегату при підтримці постійного напору в мережі є складнішою, ніж

квадратична залежність, і залежить від величини $H = H_n = \text{const}$. Механічні характеристики насосних агрегатів, отримані за представленою послідовності дій, використовуються для подальших розрахунків регульованого електроприводу насосних агрегатів на основі АД середньої потужності. Механічні характеристики необхідні для точного визначення робочої точки асинхронних двигунів.

2.2 Аналіз роботи регульованого електроприводу з асинхронними двигунами

Важливою проблемою асинхронного електроприводу для насосних агрегатів при їх експлуатації є забезпечення економічності регулювання подачі. Так, наприклад, в насосних агрегатах систем водопостачання та водовідведення лише через неекономічні способи регулювання продуктивності втрачається до 15% і більше споживаної електроенергії. Ефективним засобом вирішення зазначеної проблеми є використання регульованого по швидкості електроприводу. Більшість насосних агрегатів в водопостачанні оснащені одношвидкісними трифазними АД з короткозамкненим ротором. Але доцільніше регулювати частоту обертання за допомогою перетворювача частоти. Однак в окремих випадках може виявитися ефективним використання регулювання швидкості за допомогою регуляторів напруги. Коли АД працює з навантаженням менше номінального значення, його ККД падає внаслідок того, що створюваний магнітний потік в машині занадто великий по відношенню до магнітному потоку, достатнього для створення крутного моменту, необхідного для подолання моменту навантаження [12]. АД загальнопромислового виконання працює з повним навантаженням, має відносно високий ККД (досягає 80...96 %) [13]. Однак ККД двигуна різко падає, якщо навантаження знижується. Падіння ККД особливо відчутно коли навантаження знижується до значень менше 50 %

від номінального. В реалії електродвигуни досить рідко працюють на повну потужність, переважна більшість працює з навантаженням, значно нижчим за номінальне. Це пов'язано з тим, що в більшості випадків при проектуванні електроприводу приймається запас потужності, а також через природні коливання навантаження в умовах конкретного технологічного процесу.

Данні насосного агрегату:

- тип насосного агрегату – К 45/30;
- двигун – 4А112М4;
- потужність – 7,5 кВт;
- частота обертів – 2950 об/хв;
- продуктивність – 45 м³/с;
- напір – 31 м.

На рисунку 2.4 представлена механічна характеристика насосного агрегату, з якого видно, що навантаження на валу двигуна носить вентиляторний характер, тобто статичний момент опору на валу пропорційний квадрату швидкості, що дозволяє змінювати частоту обертання АД при зміні напруги живлення статора.

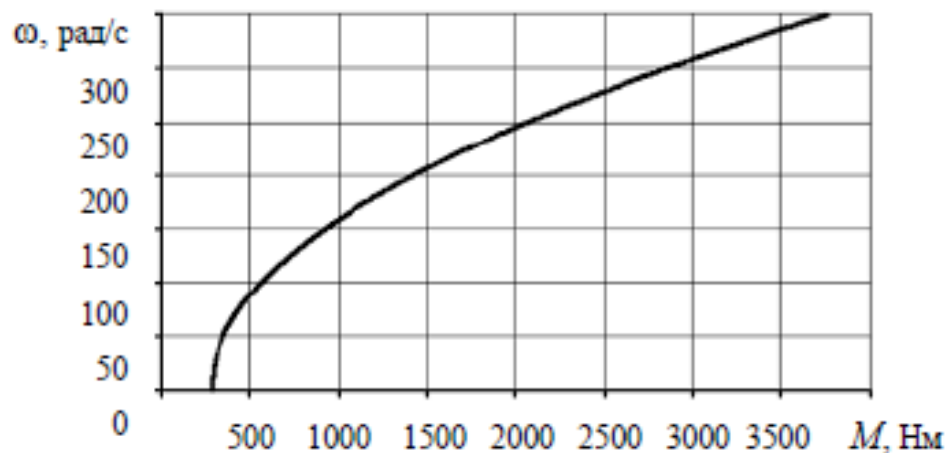


Рисунок 2.4 – Механічна характеристика насосного агрегату

Енергетичні характеристики АД при зміні напруги живлення

представлені на рисунках 2.5 і 2.6. На рисунку 2.5 представлені характеристики ККД в залежності від зміни напруги, а на рисунку 2.6 характеристики коефіцієнта потужності в залежності від зміни напруги живлення. Коефіцієнт потужності і ККД машини носять постійно падаючий характер, що зумовлено зростанням електричних втрат, а також зміною співвідношення споживаних активної і реактивної потужностей. З рисунку 2.7 видно, що при зниженні продуктивності насосного агрегату або при зниженні напруги, що подається відбувається зростання загальної суми втрат.

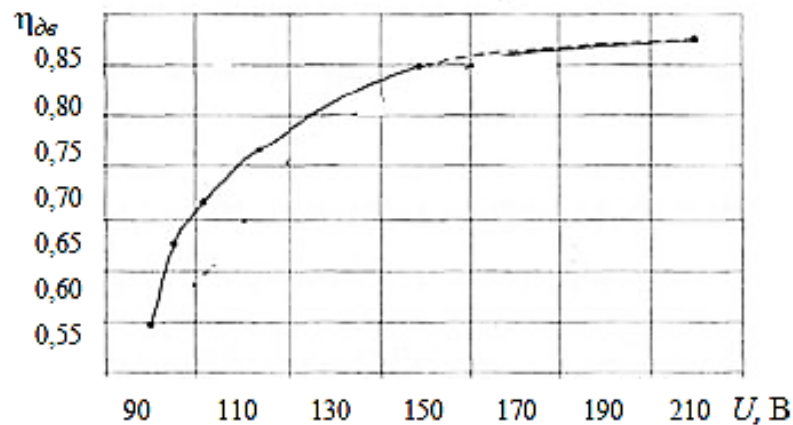


Рисунок 2.5 – ККД АД при зміні напруги статора

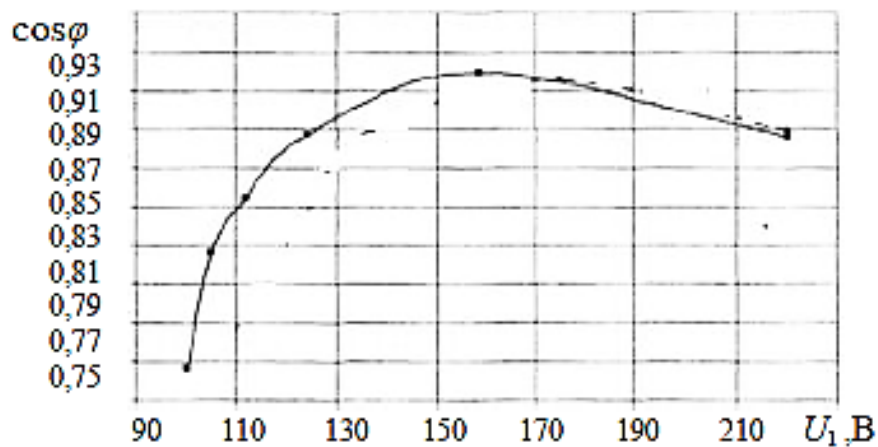


Рисунок 2.6 – Коефіцієнт потужності АД при зміні напруги

Втрати АД при зміні напруги на його статорі показано на рисунку 2.7.

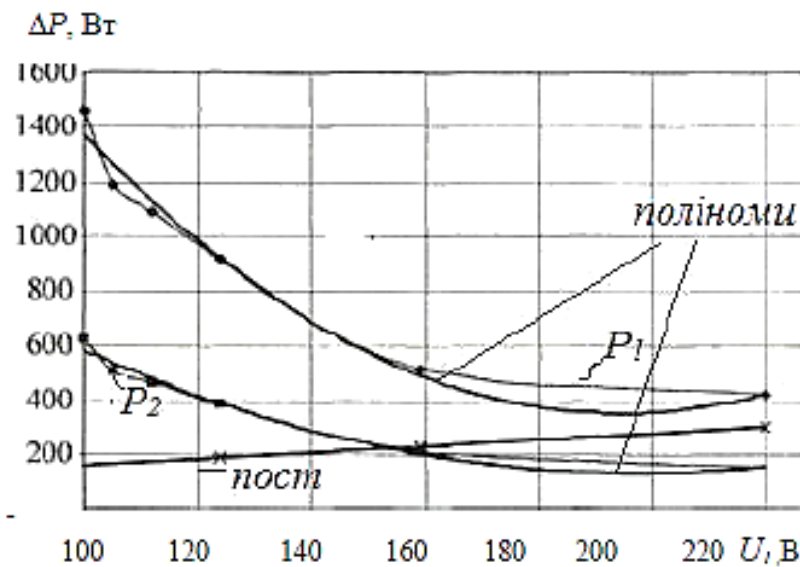


Рисунок 2.7 – Втрати АД при зміні напруги на статорі

Основне зростання втрат пов'язане зі збільшенням електричних втрат в обмотках статора і ротора. Зменшення постійних втрат не робить істотного впливу на сумарні втрати, так як електричні втрати в статорі і роторі АД мають набагато більше зростають при зменшенні напруги живлення. При зміні напруги нижче 130 В для АД виявляється неможливим при класі нагрівостійкості (F) розглянутих машин. В таблиці 2.1 та на рисунку 2.8 наведено результати порівняльного аналізу енерговитрат для насосного агрегату на основі АД с нерегульованим та регульованим приводом.

Таблиця 2.1 – Економічні параметри насосного агрегату

Період експлуатації	$\Sigma W_{\text{нрп}}$	$\Sigma W_{\text{рп}}$	$\Sigma W_{\text{ек}}$	$C_{\text{с.нрп}}$	$C_{\text{с.рп}}$	E
	кВт·г	кВт·г	кВт·г	грн.	грн.	грн.
1 рік	58692	58046	646	129123	127702	1422

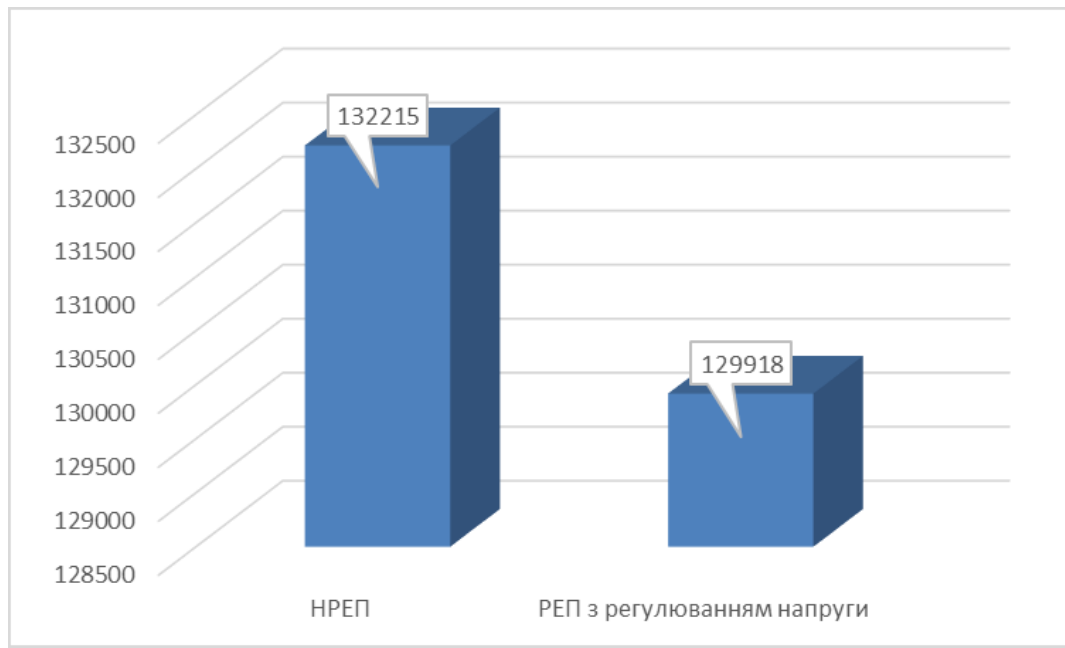


Рисунок 2.8 – Порівняння енерговитрат для нерегульованого та регульованого електроприводу насосного агрегату

2.3 Вплив законів регулювання в електроприводі на ефективність роботи асинхронних двигунів

Як відомо, частотно-регульований електропривід (ЧРЕП) використовується в різних областях діяльності, проте в області насосів перехід на регульований електропривод відбувається досить повільно. Раніше це було пов'язано, в першу чергу, з низькою надійністю ПЧ, а в нинішній час з небажанням підприємств здійснювати капітальні вкладення в енергозбереження [16].

При змінній частоті живлення АД можуть працювати при різних законах регулювання, залежними від характеру навантаження і типу системи. У ЧРЕП для регулювання або стабілізації швидкості використовують різні співвідношення між частотою і напругою [18]. Вибір конкретного співвідношення залежить від характеру моменту навантаження. Для насосних агрегатів можливе застосування різних законів регулювання, в загальному вигляді закон управління може бути

записаний як $U/f^{1+2} = \text{const}$ [18]. Оцінка енергетичних і економічних параметрів за цими законами, розглянута на базі загальнопромислових АД 4А132М4. При цьому насосний агрегат працює на мережу зі статичним опором $H_{\text{ст}} = 0,5H_{\text{н}}$.

Дані насосного агрегату:

- тип насосного агрегата К 160/20;
- двигун 4А123М4;
- потужність 11 кВт;
- продуктивність 150 м³/с;
- напір 15 м.

За результатами оцінки економічної ефективності роботи АД у складі регульованого електроприводу насосних агрегатів були отримані енергетичні та економічні показники АД при реалізації різних законів регулювання. На рисунку 2.9 представлений графік ККД асинхронного двигуна $\eta_{\text{дв}} = f(Q)$ реалізації різних законів регулювання при експлуатації в складі приводу загальнопромислового АД для насосних агрегатів К 160/20а.

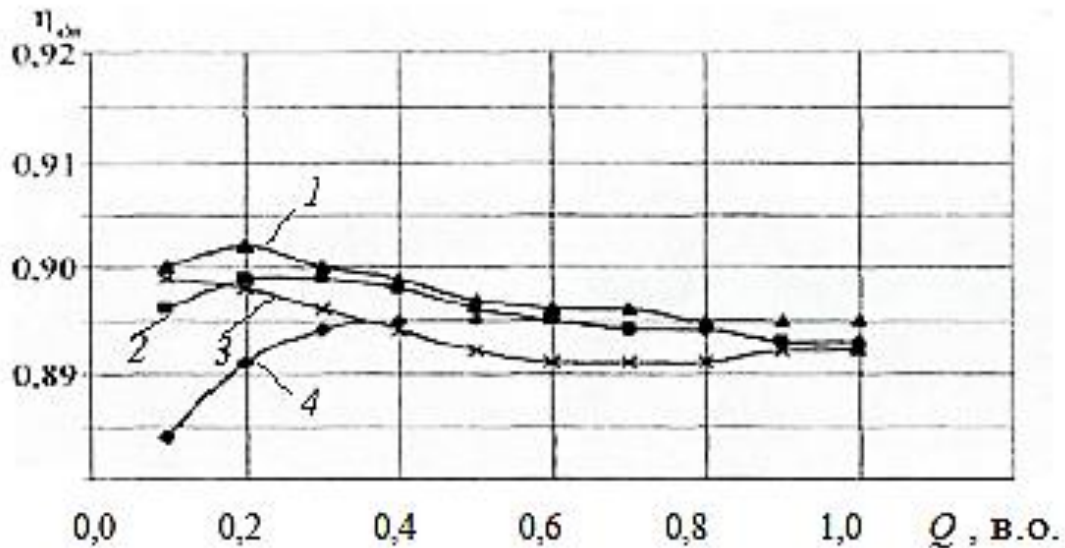
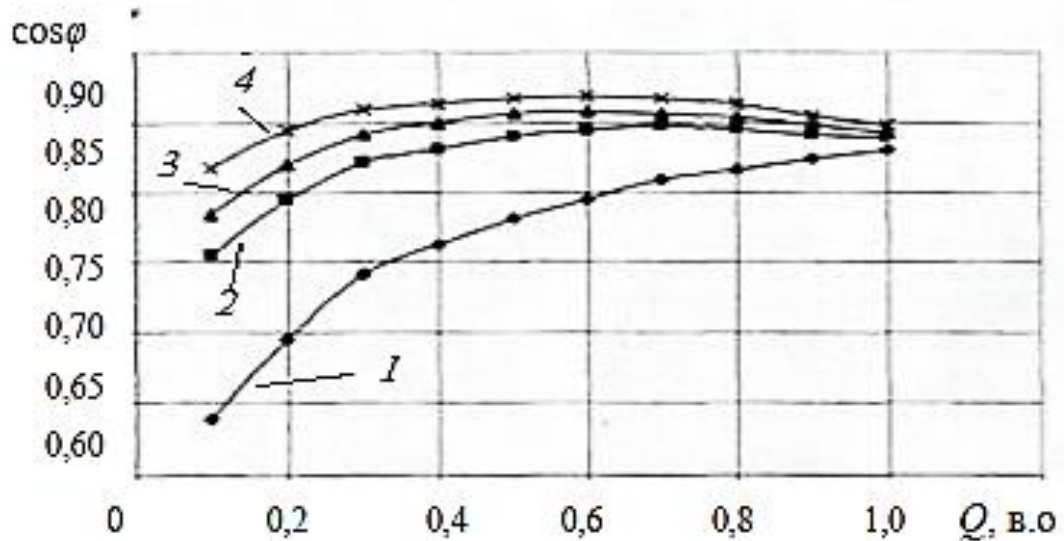


Рисунок 2.9 – Залежність ККД від продуктивності насосного агрегату при різних законах регулювання для загальнопромислового К 160/20а [18]:

1 – $U/f = \text{const}$; 2 – $U/f^2 = \text{const}$; 3 – $U/f^{2.5} = \text{const}$; 4 – $U/f^3 = \text{const}$

На рисунку 2.10 зображені характеристики коефіцієнта потужності асинхронного двигуна $\cos\varphi=f(Q)$ одержуваного при реалізації різних законів регулювання частоти обертання для насосного агрегату К 160 / 20а [18].



1 – $U/f = \text{const}$ 2 – $U/f^2 = \text{const}$ 3 – $U/f^{2.5} = \text{const}$ 4 – $U/f^3 = \text{const}$

Рисунок 2.10 – Залежність коефіцієнта потужності від продуктивності насосного агрегату при різних законах регулювання для загальнопромислового К 160/20а

Як видно з рисунку 2.10, коефіцієнт потужності виявляється більшим при збільшенні показника; ступеня в законі регулювання, що пов'язано зі зміною співвідношення між споживаним активним і реактивним струмом. Коефіцієнт потужності, виявляється найбільшим при $U/f^3 = \text{const}$, що пов'язано з перерозподілом споживаної активної та реактивної потужності.

У таблиці 2.2 представлені дані по втратах в АД для насосного агрегату К 160 / 20а, що виникають в процесі експлуатації при зміні частоти обертання, дані наведені при реалізації різних законів регулювання. Згідно з даними з таблиці 2.2 при зменшенні продуктивності насосного агрегату або частоти обертання АД відбувається зниження втрат.

Таблиця 2.2 – Втрати в асинхронному двигуні насосного агрегату К 160/20а

Q в.о.	$U/f=\text{const}$				$U/f^2=\text{const}$				$U/f^{2.5}=\text{const}$				$U/f^3=\text{const}$			
	$P_{\text{ном}}$ Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	ΣP , Вт	$P_{\text{ном}}$ Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	ΣP , Вт	$P_{\text{ном}}$ Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	ΣP , Вт	$P_{\text{ном}}$ Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	ΣP , Вт
1	295,2	553,8	229,6	1078,6	288,9	558,9	237,3	1085,1	286,7	537,1	243,6	1067,4	282,6	562,5	243,8	1088,8
0,9	288,8	509,6	206,7	1005,1	276,3	516,0	219,6	1011,9	268,8	490,3	224,8	983,9	265,5	525,8	231,6	1022,9
0,8	280,3	466,6	184,4	931,4	261,1	476,5	204,1	941,7	253,2	456,7	211,4	921,2	244,7	499,2	224,3	968,1
0,7	275,1	437,2	169,2	881,6	250,3	446,3	191,4	888,1	240,3	427,9	199,2	867,3	231,5	474,2	214,7	920,4
0,6	267,8	390,1	144,8	802,7	238,7	395	167,5	801,2	226,9	389,2	181,0	797,1	216,3	425,9	193	835,2
0,5	263,7	353,5	125,8	743,0	232,8	357,3	149,2	739,3	218,7	353,0	162,9	734,6	208,7	389,6	175,5	773,8
0,4	260,6	315,0	105,9	681,5	227,5	311,2	126,1	664,8	212,2	305,1	137,7	655,0	201,3	339,8	150,9	692,0
0,3	258,6	280,8	88,2	627,6	223,2	273	107,1	603,3	208,4	267,7	117,8	594,0	195,2	296,1	129,1	620,4
0,2	255,6	233,2	63,5	552,3	217,5	215,5	78,2	511,2	201,9	204,7	84,2	490,8	188,5	230,1	95,8	514,3
0,1	253,5	195,4	43,9	492,9	214,8	168,6	54,3	437,7	198,2	154,6	57,3	410,1	185,2	174,8	67,4	427,4

Середнє перевищення температури обмотки статора при реалізації різних законів регулювання при використанні АД представлено в таблиці 2.3 для насосного агрегату К 160/20а.

Таблиця 2.3 – Середнє перевищення температури обмотки статора при реалізації різних законів регулювання на базі К 160/20а, °С

Q, в.о.	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$U/f=\text{const}$	60;28	55,63	50,88	47,63	42;69	39,04	35,09	31,96	25,12	20,13
$U/f^2=\text{const}$	60,43	55,79	50,79	47,40	42,06	38,16	33,87	29,97	24,68	20,47
$U/f^{2.5}=\text{const}$	59,89	53,99	49;56	46,16	41,72	38,08	33,08	29,58	23,49	18,79
$U/f^3=\text{const}$	60,48	55,74	52;01	48,86	43,47	39,68	34,93	30;89	24,79	19,94

Зниження перевищення температури обмотки статора визначається зниженням електричних втрат. Для того щоб оцінити економічну ефективність роботи АД в електроприводі насосного агрегату при частотному регулюванні частоти обертання розрахуємо кількість енергії споживаної насосним агрегатом

згідно циклу навантаження, зображеному на рисунку 2.11. Розрахунок проводився в сучасному середовищі програмування MathCAD. У таблиці 2.4 представлено кількість спожитої енергії, вартість та економічний ефект в залежності від закону регулювання. Зниження кількості спожитої електроенергії в насосному агрегаті при заміні НРЕП на РЕП близько 30% в залежності виду закону регулювання.

Таблиця 2.4 – Економічні параметри насосного агрегату К 160/20а

Вид закону регулювання	ΣW	$\Sigma W_{ек}$	C_{ee}	E
	кВт·год	кВт·год	грн	грн
НРЕП	96360	0	211992	0
$U/f = \text{const}$	65791	30569	144740	67252
$U/f^2 = \text{const}$	65733	30627	144613	67380
$U/f^{2.5} = \text{const}$	65323	31037	143711	68282
$U/f^3 = \text{const}$	65758	30602	144668	67325

На рисунку 2.11 зображено гістограму з порівнянням вартості електроенергії при НРЕП та РЕП.

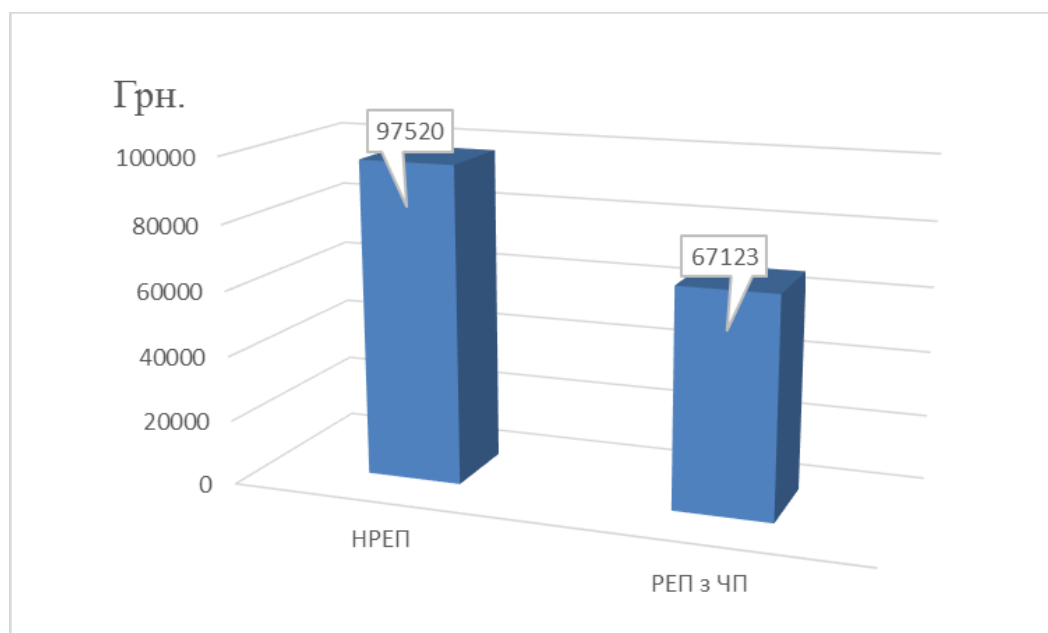


Рисунок 2.11 – Порівняння вартості електроенергії при НРЕП та РЕП з частотним перетворювачем

Як можна бачити з рисунку 2.11 використання РЕП насосних агрегатів виявляється найбільш економічно вигідним. Регулювання напруги на статорі АД в насосних агрегатах ефективно тільки при зміні частоти обертання у вузькому діапазоні, коли діапазон регулювання частоти обертання не перевищує 10 %. При реалізації частотного управління слід використовувати загальноприйнятий закон регулювання частоти обертання $U/f = \text{const}$. Тому що він не потребує здійснення додаткових вкладень. Економія спожитої електроенергії при впровадженні РЕП досягає 30 %.

Таким чином буде доцільно використання РЕП з встановленням ЧП, для цього у наступному розділі буде прораховано потужність ЧП та вибрано модель для встановлення на найбільш відповідний АД та прораховано економічний ефект і термін окупності.

3 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

Згідно даних [14 - 16] приблизно 25 % електроенергії, що виробляється споживають приводи відцентрових насосів і вентиляторів, що використовуються в різних галузях. Основна частина цих електроприводів діє в вентиляційних установках, насосних станціях, теплових електростанціях, промислових підприємствах і міських системах холодного і гарячого водопостачання, очисних спорудах, а також у опалювальних системах. Навмисна зміна подачі і напору насосів відповідно до режиму роботи системи водопостачання або водовідведення називається регулюванням. Більш раціональне використання водних ресурсів, а також значна економія енергетичних витрат останнім часом пробудили значний інтерес до загальновідомого ресурсозбереження – регульованого електроприводу насосів. Поява на світовому ринку відносно недорогих ПЧ на сучасній елементній базі дозволяє нерегульовані АД переводити на регульовані.

В умовах практичного водоспоживання потрібно часта зміна подачі води через велику кількість різнорідних споживачів [7]. Велика відмінність в кількості споживаної води в ході доби вимагає зрівнюванню водопостачання і водоспоживання для будь-якого моменту часу. При цьому потрібно не тільки забезпечити необхідні витрати, а й зберегти високий ККД в зоні регулювання [6-8]. Існуючі способи регулювання роботи відцентрових насосів, як було розглянуто раніше, діляться на два основних види [9]. Регулювання частоти обертання робочого колеса – установка насосних агрегатів з регульованим приводом, в цьому випадку при значній зміні напорів у мережі доцільно застосування частотного регулювання, а при невеликих – за допомогою регулятора напруги. При виборі типу регулювання слід мати на увазі, що частотне

регулювання здійснюється в більш широкому діапазоні, ніж при регулюванні напруги, але останнім значно дешевше.

Як відомо, дросельне регулювання є дроселюванням напірної лінії насоса. Прикриваючи або відкриваючи затвор, змінюють крутизну характеристики $H-Q$ трубопроводу, яка залежить від його гідравлічного опору. Розглянемо доцільність використання частотного регулювання насосних агрегатів для зміни подачі покажемо на прикладі відцентрового насоса К45/30 в разі його використання на станціях другого підйому [20].

На рисунку 3.1 наведена характеристика насоса, що показують залежність напору H , подачі Q і витрат потужності P при $n_1 = n_n$ [8]. Криві $H = f(Q)$ і $P = f(Q)$ при умовах $n_3 < n_2 < n_1$ принципово підуть нижче заводських характеристик.

Покажемо, що метод частотного регулювання має більшу перевагу. Це важливо, тому що при автоматизації насосних агрегатів головним завданням є забезпечення подачі необхідної кількості води при заданому напорі і мінімальній витраті електроенергії [10, 11]. Нехай характеристика трубопроводу проходить через точку A характеристики $H = f(Q)$ знятої при $n_1 = n_n$ і нехай за умовами роботи системи потрібно забезпечити витрата води від величини Q_1 до Q_3 . Як припущення вважаємо, що ця зміна відбувається в зоні незначної зміни ККД [10]. При дроселюванні робочими точками є A, B, C , при частотному регулюванні A, D, F . Цим точкам відповідають подач. На характеристиках споживаної потужності $P = f(Q)$ відзначимо точки відповідні робочим. На рисунку 3.2 представлені залежності економії споживаної потужності ΔP при частотному і дросельному регулюванні продуктивності насосного агрегату (ΔQ – зменшення подачі насосного агрегату в порівнянні з Q^*_1).

Метод частотного регулювання має більшу перевагу в порівнянні з дросельним регулюванням продуктивності насоса [10, 11]. Так, наприклад,

зменшення подачі на 30 % дає економію споживаної енергії при дросельному регулюванні 9 %, а при частотному 30 %. Крім того, при частотному регулюванні натиск не перевищує номінального значення, що веде до збільшення терміну служби обладнання.

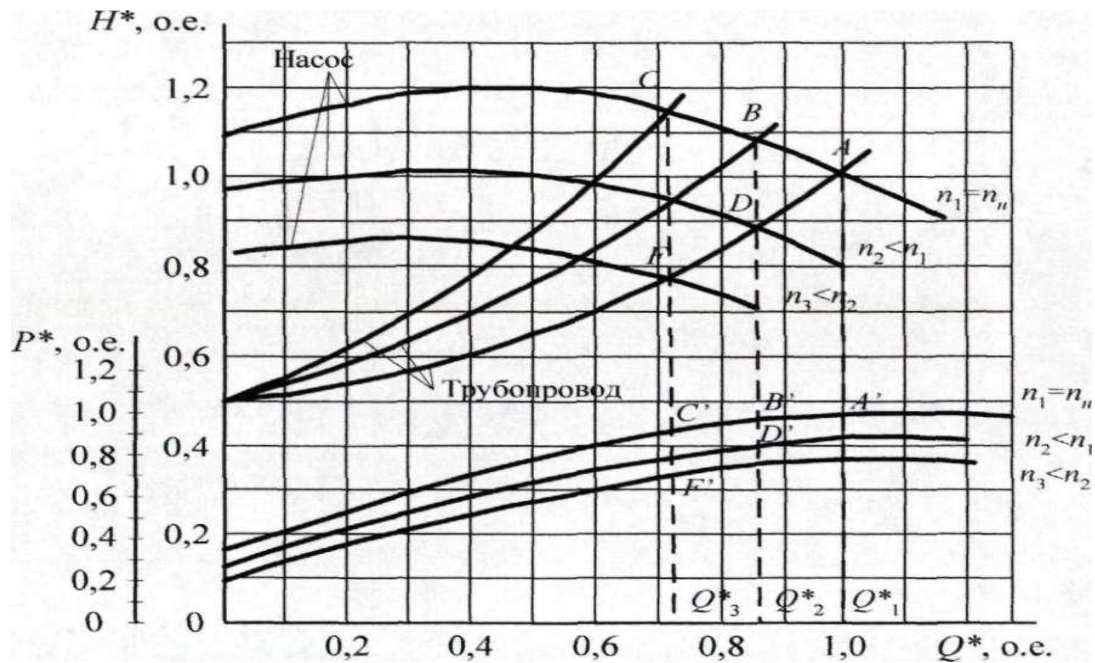


Рисунок 3.1 – Характеристики насосу і трубопроводу при різних способах регулювання

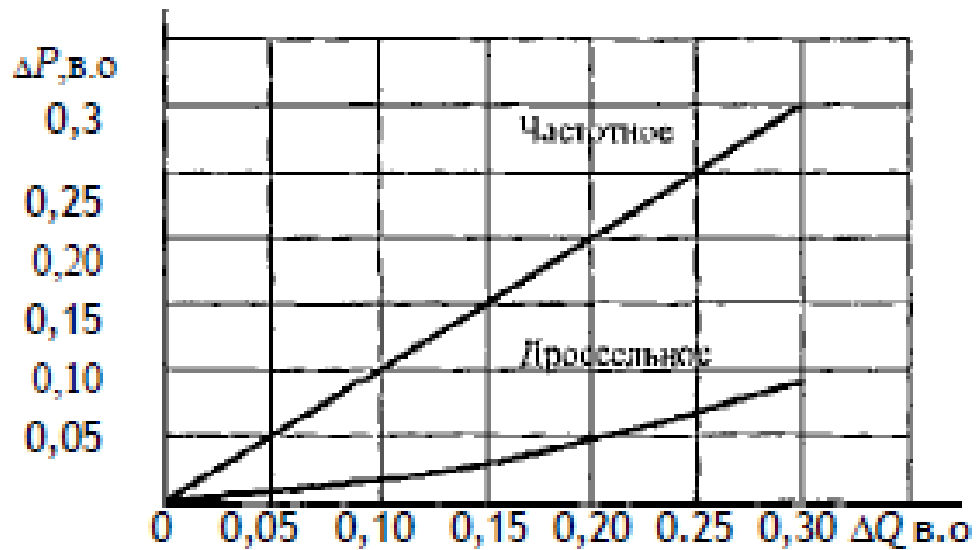


Рисунок 3.2 – Залежність економії споживаної енергії $\Delta P = f(\Delta Q)$ при різних способах регулювання

Розглянуті аспекти використання регульованого електроприводу на основі АД в насосних агрегатах дозволяють зробити висновок, що саме його використання дозволяє економити електричну енергію, а також збільшувати термін служби обладнання [9]. Однак слід також враховувати, що основні втрати електроприводу відбуваються в асинхронному двигуні.

З метою вдосконалення насосних агрегатів, застосовуваних в водопостачанні, необхідно забезпечити енергозбереження при їх роботі. Для цього є два ефективних шляхи: створення енергоефективних АД і застосування регульованих електроприводів з АД. Регульовані електроприводи мають суттєві переваги, такі як можливість економії електричної енергії, за рахунок регулювання частоти обертання і збільшення терміну служби обладнання. Регулювання частоти обертання насосних агрегатів може бути забезпечено застосуванням сучасних напівпровідникових перетворювачів, які в даний час розроблені на базі силової електроніки. Для забезпечення широкого діапазону регулювання частоти обертання слід застосовувати частотно-регульовані електроприводи на основі АД. При невеликому діапазоні регулювання частоти обертання доцільно застосовувати асинхронний електропривод з регулюванням напруги статора. Однак найбільший енерго- і ресурсозберігаючий ефект можливо отримати при використанні частотно-регульованого електроприводу на основі енергоефективних АД, що проектується для конкретних умов експлуатації в складі насосних агрегатів.

Енергозбереження, в будь-яких сферах господарювання людини, було і залишається вагомим енергетичним ресурсом. Проблема енергозбереження повинна стати, одним із пріоритетних напрямків діяльності людини. При цьому діяльність по здійсненню-енергозбереження повинна бути реальною, тобто направленою на впровадження нових технологій. На даний момент розробка і впровадження регульованого електроприводу на основі АД в області

водопостачання є одним з найперспективніших та економічно виправданих напрямків з усіх енергозберігаючих технологій. Розглянуті особливості використання регульованого електроприводу на основі АД в насосних агрегатах дозволяють зробити висновок, що покращені показники енергоефективності дозволяють знизити споживану електричну енергію не тільки за рахунок регулювання частоти обертання в насосному агрегаті, але і за рахунок зниження втрат в самому двигуні.

Розглянемо можливість економії спожитої енергії приводами насосів. На рисунку 3.3 зображена узагальнена технологічна схема системи, що забезпечує подачу води в мережу споживачів с постійним заданим тиском [7-9].

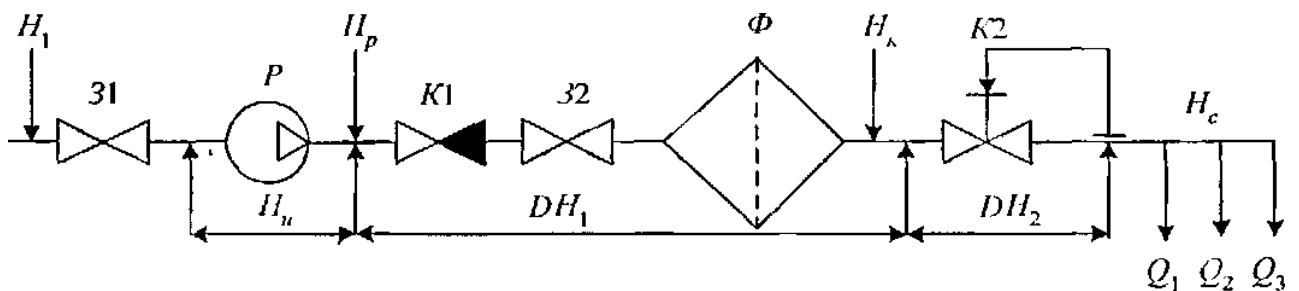


Рисунок 3.3 – Приклад спрощеної технологічної схеми з насосним агрегатом:

$З_1, З_2$ – запірні технологічні засувки; P – насосний агрегат; $К_1$ – зворотний клапан; Φ – фільтр; $К_2$ – регулюючий клапан

Основними елементами схеми є запірні технологічні засувки $З_1$ і $З_2$, насосний агрегат P , зворотний клапан $К_1$, фільтр води Φ і регулюючий клапан $К_2$. У цій схемі можна, виділити і основні технологічні параметри, серед яких: H_1 – напір, створюваний джерелом подачі води, H_p – напір, одержуваний після насосного агрегату, H_k – напір перед регулюючим клапаном, H_c – напір в мережі споживачів і $Q_{1,2,3}$ – витрати води споживачів мережі. Крім того, можна виділити напір H , що розвивається насосним агрегатом, а також втрати напору на елементах системи, розташованих між насосним агрегатом P і мережею споживачів: DH_1 – втрати напору на засувці $З_2$ і водяному фільтрі та $К_2$ – втрати

напору на регулюючому клапані.

Реальні характеристики насосу можуть бути отримані тільки при спільному аналізі характеристик насосної установки і мережі, на яку він працює [6, 7]. Характеристика мережі $H = f(Q)$ показує, який напір повинен бути створений насосом на початку мережі для переміщення по ній певної кількості рідини або газу. Цей напір складається з двох складових: $H_{ст}$ – статичного напору, що йде на підйом рідини на певну висоту і $H_{д}$ – динамічного напору, необхідного для подолання гідродинамічного опору мережі.

Точка перетину А характеристики насоса (крива 1) з характеристикою мережі (крива 2) визначає режим роботи насоса, тобто ті значення R і Q , з якими буде працювати установка (рис. 3.4) [8]. Характеристика мережі з постійними параметрами характеризується втратами напору на внутрішнє тертя, тертя потоку об стінки робочої мережі і на подолання місцевих опорів пропорційних квадрату швидкості потоку або пропорційних квадрату продуктивності насоса. При цих умовах характеристика мережі буде визначатися рівнянням (крива 2 на рис. 3.2):

$$H = H_{cm} + RQ^2, \quad (3.1)$$

де R – коефіцієнт опору мережі.

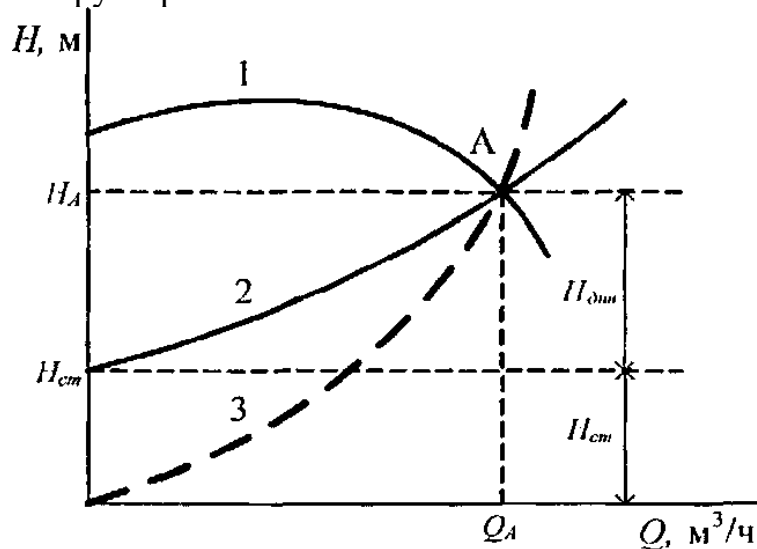


Рисунок 3.4 – Робота насоса на мережу:

1 – характеристика насоса; 2 – характеристика мережі при наявності протитиску;
3 – характеристика мережі без протитиску [8]

Величина коефіцієнта опору мережі залежить від протяжності мережі, поперечного перерізу трубопроводу, і в'язкості рідини, шорсткості стінок трубопроводу, від наявності додаткових опорів (колін, зворотних клапанів, засувок та інших елементів конструкцій) [5]. Якщо немає протитиску рівняння характеристики мережі має вигляд характеристики 3 (рис. 3.5):

$$H = R - Q_2. \quad (3.2)$$

Зміна продуктивності насоса може здійснюватися впливом на мережу (наприклад – дроселюванням), на сам насос (наприклад, поворот лопаток насоса) і на привід насосної установки (регулювання швидкості). Перші два способи називають кількісним регулюванням, третій – якісним регулюванням.

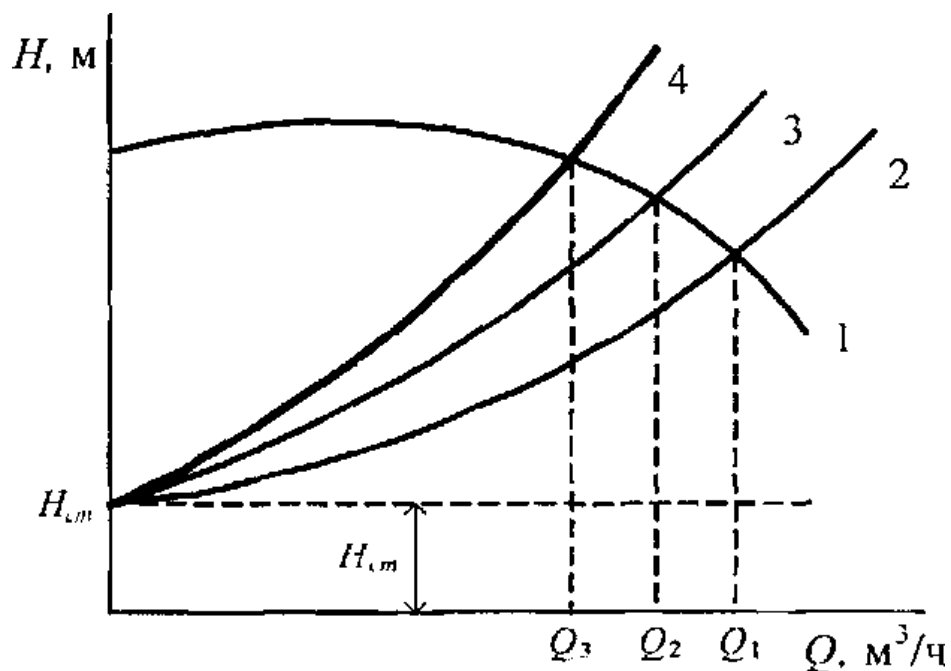


Рисунок 3.5 – Регулювання продуктивності насоса дроселюванням:

1 – характеристика насоса;

2, 3, 4 – характеристики мережі при наявності протитиску [15]

Регулювання продуктивності впливом на мережу характеристика насоса залишається незмінною (крива 1, рис. 3.5), а характеристика мережі змінює

положення (криві 2, 3, 4, рис. 3.5) і при повністю закритій засувці відповідає вертикальному положенню характеристики мережі, тобто $Q = 0$. Характеристики описуються виразом (3.1), за умови $R_2 < R_3 < R_4$.

Можна впливати на насос шляхом повороту лопаток робочого колеса, або направляючого апарату, характеристика мережі залишається незмінною, а характеристики насоса повертаються за годинниковою стрілкою при зниженні витрат [6-8]. Регулювання продуктивності зниженням швидкості характеристики насоса зміщуються вниз, а характеристика мережі залишається незмінною (рис. 3.6). Безліч характеристик насосного агрегату можуть бути знайдені за допомогою формул приведення записаних в відносних одиницях:

$$Q^* = Q_1^* \left(\frac{n_H}{n_1} \right); H^* = H_1^* \left(\frac{n_H}{n_1} \right)^2; P^* = P_1^* \left(\frac{n_H}{n_1} \right)^3$$

Регулювання за допомогою частотного перетворювача продуктивності насоса зміною швидкості обертання має сенс тільки до певної величини, при якій напір насоса стає дорівнює статичному натиску ($H_{ст}$).

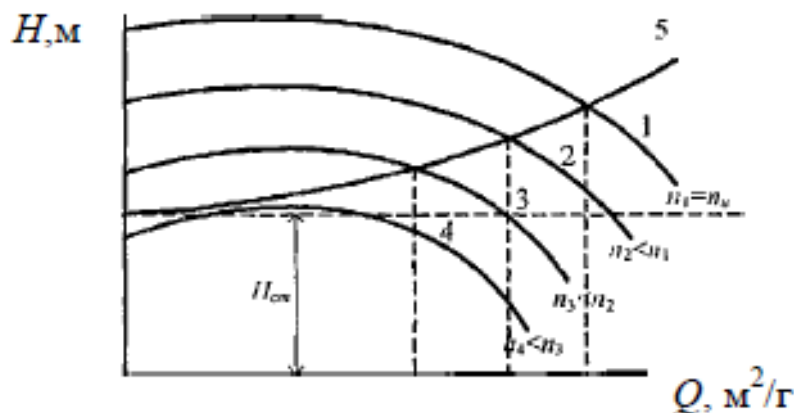


Рисунок 3.6 – Регулювання продуктивності зміною швидкості робочого колеса:

1, 2, 3, 4 – характеристики насоса;

5 – характеристика мережі при наявності протитиску [15]

Продуктивність насоса падає при цьому до нуля ($Q = 0$). При подальшому зниженні продуктивності робота двигуна буде марною. З характеристик (рис. 3.6) видно, що діапазон частотного регулювання при наявності статичної напору $H_{ст}$ обмежується його величиною. Зокрема, при частоті обертання n_4 (рис. 3.6) напір насосного агрегату буде недостатній для подолання протитиску мережі. При цьому в механічній системі даного механізму повинен спрацювати зворотний клапан. Таким чином, при наявності статичної напору виникають певні обмеження по діапазону частотного регулювання і можливостям енергозбереження при експлуатації даного механізму. Лише регулювання частоти обертання робочого колеса насосної установки дозволяє реалізувати енергозберігаючу технологію подачі рідини. Розглянувши можливі варіанти зміни продуктивності насосного агрегату, можна зробити висновок, що в області водопостачання найбільш економічно вигідним є заміна нерегульованого електроприводу на регульований електропривод на основі енергоефективних асинхронних двигунів. Використання регульованого електроприводу дозволяє реалізовувати різні режими роботи системи, при цьому забезпечуючи економічність роботи насосного агрегату на основі приводу з асинхронними двигунами. При зміні частоти обертання робочого колеса насосного агрегату досягається не тільки економія електричної енергії, а й економія за рахунок зниження позавиробничих втрат води і зниження тиску в трубопроводі. Розгляд основних характеристик і режимів роботи насосних агрегатів дозволяє зробити висновок, що регулювання частоти обертання насосів є перспективним способом вдосконалення енергозберігаючої технології подачі води. Цей спосіб має суттєві переваги в порівнянні з регулюванням дроселюванням або зміною параметрів насоса.

3.1 Електропривод з регулюванням напруги статора АД

Для раціональної підтримки постійного тиску, регулювання продуктивності насоса можна застосовувати зміну частоти обертання, інакше кажучи, використовувати регульований електропривод. Залежно від техніко-економічних показників при переобладнанні існуючих нерегульованих електроприводів насосів на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором на регульований електропривод найбільшою мірою задовольняють вимоги по енергозбереженню приводні системи з регулятором напруги і з перетворювачем частоти (ПЧ). У період, коли ПЧ не були широко поширені в силу їх високої вартості і відсутності надійної елементної бази, регулювання частоти обертання електроприводу здійснювалося за рахунок зміни напруги на статорі, тобто використання систем з регуляторами напруги. Даний спосіб регулювання частоти обертання асинхронного двигуна відрізняється простотою, однак має низку обмежень і особливостей його застосування.

Момент обертання асинхронного електродвигуна пропорційний квадрату напруги, що підводиться до електродвигуна [10]. З цієї причини зміна напруги на затискачах статора змінює форму механічної характеристики електродвигуна. Однією з ефективних можливостей підвищення надійності і економічності роботи електроприводів насосів з АД є використання тиристорних регуляторів напруги.

Механічні характеристики асинхронних двигунів при зміні величини напруги живлення U_1 можуть бути також знайдені з виразу [10 - 12]:

$$M_{\text{об}} = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 \right]},$$

де U_1 – фазна напруга;

R_1 – активний опір обмотки фази статора;

R_2 – наведене активний опір обмотки ротора;

X_1 – індуктивний опір розсіювання обмотки статора;

X_2 – наведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора;

n_0 – синхронна частота обертання ротора;

ω_0 – синхронна кутова швидкість;

s – ковзання.

Частота обертання асинхронних двигунів регулюється шляхом зміни напруги обмотки статора пов'язане з можливістю перегріву статора і ротора і може проводитися лише за певних умов:

- при малому діапазоні зниження швидкості щодо номінальної;
- при зниженні, щодо номінального, моменту опору на валу двигуна;
- при використанні двигуна з підвищеним ковзанням.

Якщо момент опору на валу двигуна залишається постійним і рівним номінальному $M_C = M_n$, то з ростом ковзання асинхронних двигунів буде перегріватися [9]. Тому регулювання швидкості АД зміною напруги статора можливо в тому випадку, коли момент опору M_c при зниженні швидкості істотно менше номінального моменту. Властивістю зниження моменту опору зі зменшенням швидкості мають вентиляторні навантаження:

$$M_c = M_0 + b \cdot n^k, \quad (3.5)$$

де M_0 – момент від сил тертя;

b – коефіцієнт;

k – показник ступеня,

$k > 2$ – є функцією параметрів мережі;

$H_{ст}$ і R – характеристик насосного агрегату $H-Q$.

Механічна характеристика насоса дозволяє йому працювати на ділянці

механічної характеристики АД з ковзаннями, більшим критичного, що практично недосяжно для інших видів навантажень. Однак робота з великими ковзаннями викликає і великі втрати в роторі АД. При зміні напруги значення критичного ковзання не змінюється, тому максимальний момент при будь-яких змінах напруги відповідає одному і тому ж значенню ковзання, рівному приблизно $0,1...0,2$ [19]. Цим визначається порівняно вузький діапазон регулювання по частоті обертання, який може забезпечити цей спосіб регулювання. Діапазон регулювання не перевищує $20...25\%$ номінального значення частоти обертання. При регулюванні швидкості зміною напруги вдається знизити енергоспоживання в $1,5...2$ рази [20]. Економія електроенергії буде тим більше, чим менше момент двигуна, в порівнянні з номінальним, і чим більше працює двигун з недовантаженням. Використання системи регулювання частоти обертання електроприводу на основі регуляторів напруги дозволяє вирішувати питання енергозбереження, даний метод показує свою ефективність при необхідному малому діапазоні зміни частоти обертання. При цьому вартість регуляторів напруги набагато нижче вартості ПЧ. Однак даний метод виявляється не вигідним при широкому діапазоні регулювання, так як при певному рівні зниження напруги живлення відбувається перегрів обмотки статора АД.

Електропривод АД на базі частотно-регульованого перетворювача. Більш раціональним методом підтримки постійного тиску, регулювання витрати води (продуктивності насоса) є використання ПЧ. Синхронна частота обертання трифазного АД пропорційна частоті живильної мережі, що дозволяє регулювати частоту обертання двигуна плавною зміною частоти і напруги поданої на статор. Це найбільш економічний спосіб плавного регулювання швидкості АД, так як двигун у всьому діапазоні регулювання частоти обертання насосного агрегату працює з малою частотою ковзання ротора. Способи частотного регулювання швидкості електроприводів змінного струму з короткозамкненим АД знаходять все більше застосування в галузях водопостачання [23]. Перетворення змінної

напруги мережі живлення в змінну напругу з регульованою частотою, напругою і струмом здійснюють ПЧ. Так як при частотному регулюванні величина індуктивного опору двигуна змінюється пропорційно частоті, то для збереження будь-якого вихідного параметра незмінним необхідно зі зміною частоти змінювати напругу на статорі за певними законами.

Найбільш раціональною характеристикою для насосів є значення максимальної продуктивності при максимальній швидкості і номінальній напрузі на статорі, коли обмежується струм статора або сумарні втрати в двигуні на рівнях, передбачених паспортними даними двигуна. Для забезпечення стійкої роботи електродвигуна, обмеження його перевантаження по струму і магнітному потоку, підтримки високих енергетичних показників ПЧ повинен підтримувати певне співвідношення між вхідними та вихідними параметрами, залежними від виду механічної характеристики насоса. Ці співвідношення виходять з рівняння закону частотного регулювання:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}$$

Насоси, які працюють без статичного напору, тобто тих, в яких механічна характеристика описується рівнянням квадратної параболи, тобто в рівнянні показник ступеня $K = 2$, має дотримуватися співвідношення:

$$\frac{U_1}{f_1^{1+\frac{k}{2}}} = \frac{U_2}{f_2^{1+\frac{k}{2}}}$$

де k – показник ступеня в рівнянні механічної характеристики насоса.

Для більшості випадків, в насосних установках використовуються ПЧ

промислового виконання, що забезпечують співвідношення [20]:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \text{const}$$

Момент асинхронного двигуна при частотному регулюванні буде визначатися співвідношенням [22]:

$$M_{\text{дв}} = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

де $X_{\text{мн}}$ – індуктивний опір контуру намагнічування;

$f_{1*} = \frac{f_1}{f_{1n}}$ – відносне значення частоти напруги живлення.

В світовій практиці широко використовується частотно-керований асинхронний електропривод зі стандартними короткозамкненими АД загального застосування. Це обумовлено появою великої кількості сучасних і відносно недорогих ПЧ, побудованих на сучасній елементній базі [19]. Використання ПЧ для регулювання продуктивності насосних агрегатів на даний момент є найбільш економічно вигідним і доцільним, регульований електропривод є перспективним способом, енергозбереження, а також економії водних ресурсів. Можливість подібного регулювання покращує динаміку роботи електродвигуна і, тим самим, підвищує надійність і довговічність роботи технологічного обладнання. При цьому система дозволяє автоматично змінювати частоту обертання електродвигуна таким чином, щоб підтримувати на заданому рівні різні параметри системи, наприклад, тиск, витрата, температуру, рівень рідини. За рахунок оптимального управління електродвигуном в залежності від

навантаження, споживання електроенергії в насосних агрегатах знижується на 40...50 %. Однак найбільший енерго- і ресурсозберігаючий ефект можливо отримати при використанні частотно-регульованого електроприводу на основі, що проектується для конкретних умов експлуатації в складі насосних агрегатів. Розгляд основних характеристик і режимів роботи насосних агрегатів дозволяє зробити висновок, що регулювання частоти обертання насосів є перспективним способом вдосконалення енергозберігаючої технології подачі води. Цей спосіб має суттєві переваги в порівнянні з дроселюванням.

З метою забезпечення широкого діапазону регулювання частоти обертання слід застосовувати привід на основі ПЧ. При невеликому діапазоні регулювання частоти обертання доцільно застосовувати асинхронний електропривод з регулюванням напругою статора. Таким чином, метою даного дослідження є створення моделі оцінки економічної ефективності роботи АД в регульованих електроприводах насосних агрегатів при реалізації різних способів регулювання частоти.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

4.1 Оцінка ефективності впровадження частотно-регульованого електроприводу

Методики та оцінка ефективності енергозбереження в асинхронних двигунах. Основними причинами неекономічної роботи насосної установки є невідповідність робочих параметрів насоса (напору H , подачі Q) режиму роботи системи. Регулюванням частоти обертання насоса його робочі параметри приводяться у відповідність з режимом роботи водопровідної мережі. Насосні агрегати застосовуються в багатьох галузях народного господарства, тому застосування асинхронного регульованого електроприводу для них є актуальною проблемою, вирішення якої пов'язане з енергозбереженням. У цих агрегатах АД є основним перетворювачем електричної енергії в механічну але в даний час йому приділяється недостатньо уваги. При експлуатації АД обов'язково повинні проводитися економічні розрахунки, що дозволяють судити про економічну ефективність проведених покращень [16 - 18]. Економічні розрахунки при експлуатації АД проводяться для визначення економічної ефективності і техніко-економічного обґрунтування вибору оптимального варіанта. Одна з методик за основу приймає розрахункову величину сумарних витрат, що припадають на термін експлуатації. Використовується ця методика при експлуатації АД для оцінки економічної ефективності. Критерієм доцільності створення і впровадження нових розробок є економічний ефект. Річний економічний ефект являє собою сумарну економію всіх виробничих ресурсів (живої праці, матеріалів, капітальних вкладень). Визначення економічного ефекту ґрунтується на зіставленні наведених витрат по базовій і новій техніці [17]. Наведені витрати являють собою суму собівартості і нормативного прибутку:

$$Z = C + E_n K,$$

де Z – наведені витрати на одиницю продукту;

C – собівартість одиниці продукції;

K – питомі капітальні вкладення у виробничі фонди;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

При визначенні річного економічного ефекту повинна бути забезпечено порівняння нових і базових машин. При експлуатації машини критерієм економічної ефективності при виборі найкращого варіанта служать найменші приведені витрати на розробку, впровадження, виготовлення і експлуатацію двигуна за нормативний термін окупності [14]:

$$Z_m = K(C + C_r) + C_a T_n + C_{омп},$$

де $K = 1 + T_n (\rho_{ам} + \rho_0)$ – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування і витрати на обслуговування при експлуатації;

$\rho_{ам}$ – амортизаційні відрахування ($\rho_{ам} = 0,065$);

ρ_0 – відносні витрати на обслуговування при експлуатації ($\rho_0 = 0,069$);

C_d – виробнича собівартість двигуна;

$C_{комп}$ – витрати на необхідні виробничі площі, введені в розрахунок для обліку компактності двигуна;

C_r – витрати на пристрої, що компенсують.

Наведена вище методика розрахунку визначення економічної ефективності експлуатації АД володіє такою важливою перевагою, як простота і доступність у використанні. Однак дана методика не враховує особливості, що накладаються на машину областю застосування АД. Питання енергозбереження

все частіше вирішуються сьогодні за допомогою високих технологій. Одне з головних напрямків тут займає впровадження в різні галузі промисловості і комунальне господарство регульованих електроприводів на основі ПЧ.

Застосування регульованого електроприводу в насосних агрегатах, з одного боку, веде за собою зменшення витрат електроенергії, з іншого боку, вимагає додаткових капітальних витрат [18]. Тому доцільність застосування енергозберігаючих заходів, таких як впровадження регульованого електроприводу в насосні агрегати завжди визначається порівнянням наведених витрат базового і нового. В якості нового варіанту приймається насосний агрегат, оснащений регульованим електроприводом, а в якості базового - насосний агрегат, який працює з постійною частотою обертання. Для розрахунку економічного ефекту від зниження витрати споживаної електроенергії розрахуємо потужність, споживану насосним агрегатом з електричної мережі [9, 12]:

$$P = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{102 \cdot \eta_{уст}}$$

де ρ – щільність води;

Q – подача;

H – напір на виході насоса;

$\eta_{уст} = \eta \cdot \eta_n$ – ККД нерегульованого насосного агрегату;

$\eta_{уст} = \eta \cdot \eta_n \cdot \eta_{пч}$ – ККД регульованого ПЧ насосного агрегату;

$\eta_{дв}$ – ККД асинхронного двигуна;

η_n – ККД насосного агрегату;

$\eta_{пч}$ – ККД перетворювача частоти.

Середньодобова економія електроенергії при незмінному водоспоживанню в базовому (нерегульованому) і регульованому ПЧ режимах [13]:

$$P = \frac{\rho \cdot Q_{\text{сут}} \cdot H_{\text{нрп}}}{102 \cdot \eta_{\text{уст}}} - \frac{\rho \cdot Q_{\text{уст,рп}} \cdot H_{\text{рп}}}{102 \cdot \eta_{\text{уст,рп}}}$$

де $Q_{\text{сут}}$ – добова подача води насосним агрегатом;

$Q_{\text{сут,рп}}$ – добова подача води насосним агрегатом при регульованому електроприводі;

$H_{\text{нрп}}$ – напір на виході насоса в нерегульованому режимі;

$H_{\text{рп}}$ – напір на виході насоса в регульованому режимі;

η – ККД насосного агрегату в нерегульованому режимі;

– ККД насосного агрегату в регульованому режимі.

Тоді річний економічний ефект від зниження споживання електроенергії:

$$E = C_e \cdot 365 - P_{\text{доб}}$$

де C_e – тариф на електроенергію, вартість за 1 кВт-год спожитої електроенергії.

Крім того, застосування систем автоматичного управління з регульованим електроприводом знижує витрату води за рахунок стабілізації тиску в системі подачі і розподілу води, а також збільшує термін служби і міжремонтних періодів, зменшує витрати на придбання, монтаж і обслуговування запірної арматури [12].

Дана методика визначає економічну ефективність, що отримується при впровадженні не враховує зміну параметрів машини при зміні частоти обертання при регулюванні продуктивності. Друга методика не враховує параметри АД, тобто не приймає до розгляду механічні характеристики АД, одержувані в результаті зміни частоти обертання і механічні характеристики насосного агрегату в якості навантаження АД. Кожна з розглянутих методик не охоплює повною мірою всі елементи регульованого електроприводу. Перша методика

загальнопромислового виконання. Тому необхідно додатково розглянути особливості роботи асинхронного двигуна в насосних агрегатах. Для комплексної оцінки; економічної ефективності роботи насосних агрегатів була створена математична модель оцінки економічної ефективності роботи АД у складі регульованого електроприводу насосних агрегатів. Ця модель повинна враховувати основні: електромеханічні процеси, що відбуваються як в АД, так і в перетворювачі. Модель охоплює електромагнітні і економічні розрахунки, що дозволяють оцінити економічність роботи асинхронної машини в складі електроприводу. Для оцінки економічної ефективності роботи АД в складі насосного агрегату слід повністю враховувати особливості: процесу експлуатації регульованого електроприводу насосного агрегату, до складу якого входить насос, ПЧ або перетворювач напруги і АД загальнопромислового виконання.

У вихідних даних для математичної моделі можуть бути використані дані геометрії АД. Керуючись заданими геометричними розмірами машини, характеристиками насоса і трубопроводу представляється можливим визначити економічну ефективність при різних законах регулювання. Цикл навантаження визначає дані по продуктивності насосного агрегату, який проміжок часу працює насосний агрегат при певній продуктивності (рис. 4.1) [20]. Основою для отримання циклу навантаження служить добовий графік водоспоживання.

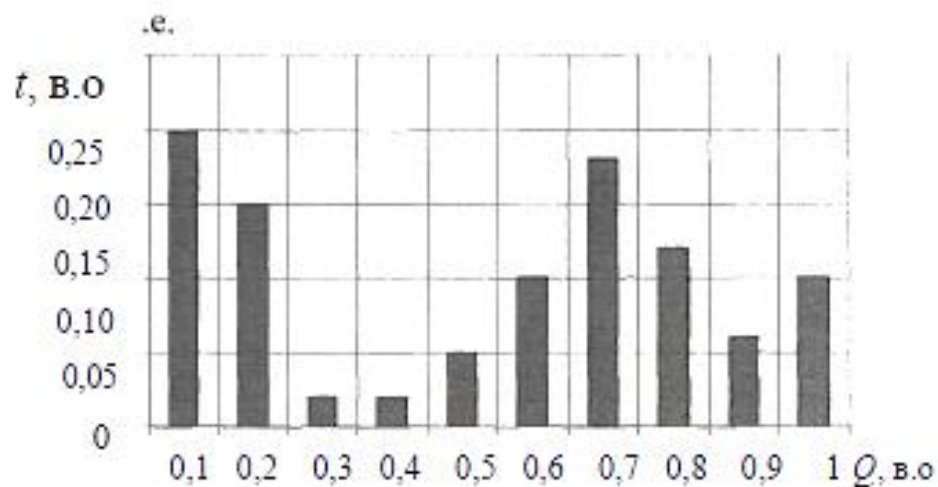


Рисунок 4.1 – Цикл навантаження насосного агрегату

На основі даних циклу навантаження і механічної характеристики насосного агрегату проводиться розрахунок оцінки економічної ефективності. Розрахунок здійснюється на базі математичної моделі. Регулювання частоти обертання електроприводу насосного агрегату здійснюється за допомогою наступних законів регулювання напруги на статорі, при постійній частоті $f = 50$ Гц; одночасна зміна частоти і напруги по законам $U/f = \text{const}$, $U/f^2 = \text{const}$, $U/f^{2.5} = \text{const}$, $U/f^3 = \text{const}$.

Кількість спожитої електроенергії за рік [21, 23]:

$$\sum W = \sum P_n \cdot t,$$

де t – час роботи насосного агрегату;

$\sum P_n$ – потужність спожита насосним агрегатом при певному значенні подачі насосного агрегату.

Потужність, споживана насосним агрегатом, визначається з виразу [18]:

$$P_n = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{1000 \cdot \eta_n \cdot \eta_{дс} \cdot \eta_{мч}},$$

Електричні втрати в асинхронному двигуні розраховують окремо для обмоток статора і ротора, так для обмотки статора, при цьому для різних законів регулювання продуктивності насосних агрегатів маємо різні значення втрат [21]:

$$P_{cm} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1,$$

де m_1 – число фаз обмотки статора;

I_1 – струм фази обмотки статора;

R_1 – активний опір фази обмотки статора.

Отже струм в обмотці фази статора може визначатися з виразу, приймаючи, що струм намагнічування I_0 є чисто реактивним:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

де

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{\text{кн}} f_{1*}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 f_{1*}^2}},$$

I_2 – наведене значення струму обмотки ротора;

R_1 – наведене значення активного опору фази обмотки ротора;

f_{1*} - відносне значення частоти напруги живлення;

$X_{\text{кн}}$ – індуктивний опір короткого замикання;

s – ковзання.

Відносне значення напруги живлення:

$$f_{1*} = \frac{f_{1i}}{f_{1n}},$$

де f_{1i} – частота напруги живлення при реалізації різних законів управління;

f_{1n} – номінальне значення частоти напруги живлення рівне 50 Гц.

Наведене значення струму в обмотці ротора обчислюється по:

$$I_2' = \frac{U_{1i}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 R_2'}{s X_{\text{мн}} f_{1*}}\right)^2}},$$

де U_{1i} – величина напруги при реалізації різних законів управління;
 X_n – індуктивний опір контуру намагнічування.

Для ротора електричні втрати розраховуються в такий спосіб [24]:

$$P_p = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = Z_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 ,$$

$$P_p = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 ,$$

де m_2 – число фаз обмотки ротора;

I_2 – струм фази обмотки ротора;

R_2 - активний опір фази обмотки ротора.

Вираз для визначення електричних втрат в обмотці ротора [24]:

$$P_p = m_1 \cdot R_2' \cdot \frac{U_{1i}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_{1*}}\right)^2}} ,$$

Постійні втрати [24]:

$$P_{пост} = P_{мех} + P_{ст},$$

де $P_{мех}$ – механічні втрати;

$P_{ст}$ – втрати в сталі магнітопроводу машини.

Механічні втрати визначаються за формулою [24]:

$$P_{\text{мех}} = (1 \div 1,3) \cdot \left(\frac{2\pi f_{1i}}{1000} \right)^2 \cdot D_a^2,$$

D_a – зовнішній діаметр статора;

f_{1i} – частота напруги живлення при реалізації різних законів керування.

Втрати в сталі магнітопроводу поділяються на основні та додаткові:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.доб}} + P_{\text{ст.осн}},$$

Основні втрати в сталі визначаються виразом [24]:

$$P_{\text{ст.доб}} = \rho_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_{1i}}{50} \right)^\beta (1,6 \cdot B_a^2 \cdot m_a + 1,8 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}),$$

де $\rho_{1,0/50}$ – питомі втрати в сталі магнітопроводу, залежать від марки сталі;

β – показник ступеня, залежить від марки сталі;

B_{z1}, B_a – індукції в ярмі і зубцях сердечника статора;

m_a, m_{z1} – маса ярма і зубців сердечника статора. Сума втрат може бути визначена за формулою [24]:

$$P = P_{\text{пост}} + P_{\text{ст}} + P_p,$$

Коефіцієнт корисної дії може бути визначений за формулою [24]:

$$\eta_{\text{де}} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1},$$

де P_1 – споживана з мережі потужність, яка визначається як:

$$P_1 = P_{2н} + \Sigma P.$$

Коефіцієнт потужності визначається як [24]:

$$\cos\varphi_{дв} = \frac{I_{1a}}{I_1},$$

де I_1 – струм фази обмотки статора;

I_{1a} – активна складова струму фази обмотки статора.

Економія спожитої електричної електроенергії за рік при впровадженні РЕП замість НРЕП може бути розрахована за такою формулою:

$$\Sigma W_e = \Sigma W_{e} - \Sigma W_{e},$$

де $\Sigma W_{нреп}$ – кількість електроенергії спожитої за рік у разі нерегульованого електроприводу;

$\Sigma W_{реп}$ – кількість електроенергії спожитої за рік у разі регульованого електроприводу насосного агрегату.

Вартість електроенергії споживаної насосним агрегатом за рік експлуатації:

$$C_{ee} = \Sigma W \cdot C_{ee},$$

де C_{ee} – вартість електроенергії за 1 кВт спожитої енергії.

Тоді економія спожитої електроенергії за рік може бути визначена за

формулою:

$$E = C_{\text{еє.нрєп}} - C_{\text{еє.рєп}} ,$$

Для визначення відсотка економії електроенергії при впровадженні регульованого ЕП замість нерегульованого приводу на основі базової машини скористаємося формулою:

$$E_{\%} = \frac{C_{\text{еє.нрєп}} - C_{\text{еє.рєп}}}{C_{\text{еє.нрєп}}} \cdot 100\% .$$

Також на основі отриманих даних будуються поліноміальні залежності втрат електричної енергії в АД від напруги, що подається $P_{\text{ст}} = f(U_1)$, $P_p = f(U_1)$, $P_{\text{ност}} = f(U_1)$. Дані поліноми будуються для варіантів регульованого електроприводу при реалізації різних законів управління. Отримані поліноміальні залежності використовуються для проведення аналізу ефективності використання регульованого електроприводу при реалізації різних законів регулювання [21 - 25]. У нерегульованих електроприводів насосних установок відсутня можливість зниження споживання електроенергії при зменшенні технологічних навантажень. Названа особливість експлуатації насосних установок є причиною підвищеного енергоспоживання. Перехід до систем регулювання частоти обертання призведе до збільшення терміну служби насосів і їх приводних двигунів, а також до помітної економії електроенергії, у багатьох випадках до 30...40 % [27].

Математична модель оцінки економічної ефективності РЕП насосних агрегатів і виконана в сучасному середовищі програмування MathCAD. Підводячи підсумки, можна констатувати наступне: створено математичну

модель оцінки економічної ефективності роботи АД в складі РЕП насосних агрегатів, визначені допущення, розглянуті варіанти для актуальної вартості електричної енергії.

Таким чином, проведена оцінка економічної ефективності роботи АД у складі електроприводу насосних агрегатів при регулюванні напруги живлення. Використання даного способу регулювання частоти обертання для насосних агрегатів буде ефективним тільки при зміні частоти обертання у вузькому діапазоні, діапазон регулювання частоти обертання не перевищує 10%. Даний спосіб регулювання виявляється найбільш доцільним в порівнянні з частотним регулюванням, якщо потрібно забезпечити вузький діапазон зміни частоти обертання.

У попередніх розділах було показано переваги асинхронних двигунів, які набули широкого поширення в якості приводних агрегатів промислових механізмів, проте істотними недоліками асинхронних машин являється високий рівень пускових струмів, певні труднощі регулювання частоти обертання [24]. Із спектру різних рішень, застосовуваних для енергозбереження, одне з найбільш ефективних і швидкоокупних, що вимагають відносно невеликих капіталовкладень – впровадження високотехнологічної та наукоємної, енергозберігаючої техніки – частотно-регульованих приводів, що дозволяють оптимізувати режими роботи обладнання в широкому діапазоні зміни навантажень.

З їх допомогою на двигун подається необхідна кількість енергії для створення і підтримування необхідного рівня тиск/розрядження в системі. Частотний перетворювач для насосів водопостачання є електротехнічним приладом, який перетворює постійну напругу електромережі в змінну по заздалегідь заданій амплітуді і частоті [24]. Практично всі сучасні перетворювачі виконані за схемою подвійної зміни струму. Така конструкція складається з трьох основних частин:

- некерований випрямляч;
- імпульсний інвертор;
- система управління.

Важливим елементом конструкції є імпульсний інвертор, який в свою чергу складається з 5-8 ключів-транзисторів. До кожного з ключів підключається відповідний елемент обмотки статора електродвигуна. Система керування представлена мікропроцесором, який паралельно виконує функції захисту (відключає насос при сильних коливаннях струму в електромережі) і контролю.

Частотний-перетворювач під певний тип насоса обираємо за критеріями [25]:

- за потужністю – якщо потужності устаткування приблизно однакові, то вибираються перетворювачі однієї фірми, з потужністю за максимальної потужності навантаження. Так забезпечується взаємозамінність і спрощується обслуговування обладнання;
- за мережевою напругою – обирається перетворювач з максимально широким діапазоном напруги як вниз, так і вгору. Знижена напруга призведе, до відключення частотного перетворювача, підвищена може викликати вибух мережевих електролітичних конденсаторів і виходу приладу з ладу;
- за діапазоном регулювання частоти – нижня межа визначає діапазон регулювання швидкості приводу;
- за кількістю входів управління – дискретні входи потрібні для введення команд управління (пуск, стоп, реверс, гальмування тощо). Аналогові входи необхідні для введення сигналів зворотного зв'язку (регулювання і настройки приводу в процесі роботи). Цифрові входи потрібні для введення високочастотних сигналів від цифрових датчиків швидкості і положення. Чим більше входів, тим складнішу систему можна побудувати;

- за кількістю вихідних сигналів – дискретні виходи використовуються для виходу сигналів про різні події (аварія, перегрів, вхідна напруга вище або нижче рівня, сигнал помилки тощо). Аналогові виходи використовуються для побудови складних систем із зворотними зв'язками. Рекомендації по вибору аналогічні попередньому пункту;
- по шині управління – обладнання, за допомогою якого відбувається керування частотним перетворювачем повинно мати ту ж шину і кількість входів виходів що і вибраний частотний перетворювач. Передбачається деякий запас входів і виходів для подальшої модернізації;
- за терміном гарантії – термін гарантії побічно дозволяє оцінити надійність частотного перетворювача. Природно, потрібно вибирати частотний перетворювач з великим терміном.

Обираємо частотний-перетворювач, який співпадатиме по всім критеріям, проводиться порівняння різних брендів та різної цінової політики, наведено в таблиці 4.1.

Таблиці 4.1 – Технічні характеристики перетворювача частоти

№ з.п	Бренд	Серія	Потужність, кВт	Число фаз/напруга, В	Частота, Гц	Ціна, грн
1	Schneider Electric	Altivar650	250,0	три фази, 380	500	471493
2	Hyundai	VFD43A	250,0	три фази, 380	400	671743
3	INVT	GD300	250,0	три фази, 380	400	266210

Тобто частотний перетворювач фірми Hyundai VFD43A та частотний перетворювач фірми INVT GD300 співпадають за критеріями: потужність, число фаз/напруга, частота. Вагомим у виборі, являється те що, фірма INVT є

бюджетною, тому обираємо його.

Перетворювач частоти Goodrive300 – це новий тип високопродуктивних перетворювачів частоти з векторним керуванням, призначених для управління асинхронними двигунами і синхронними двигунами з постійним магнітом. Перетворювач заснований на 32-бітному цифровому сигнальному процесорі і використовує алгоритм векторного керування, завдяки чому забезпечує високопродуктивне і високоточне управління обертанням двигуна. Пристрої даної серії володіють підвищеною надійністю, допускають використання в різних кліматичних умовах, і в той же час мають більш зручну в експлуатації і пристосовану для промислового застосування конструкцію [8]. Перетворювач частоти (ПЧ) Goodrive 300 встановлюють на стіну, а також може бути фланцевого виконання.

Силова схема перетворювача частоти показана на рисунку 4.1.

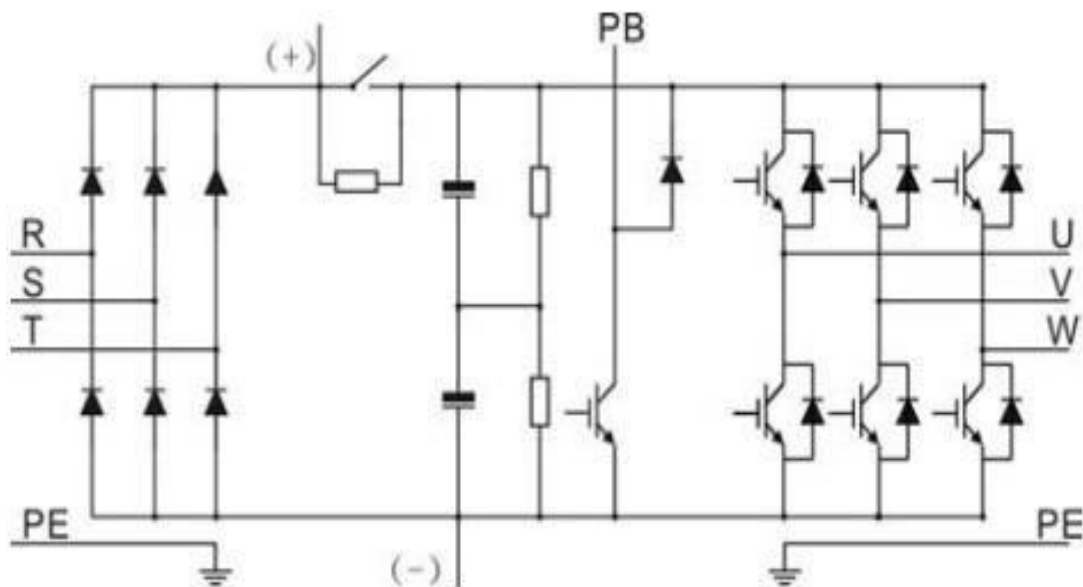


Рисунок 4.1 – Силова схема перетворювача частоти [25]

На рисунку 4.2 показано зовнішній вигляд ПЧ.



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд частотного перетворювача

Випрямляч перетворює трифазну напругу змінного струму в напругу постійного струму. Конденсатори стабілізують напругу постійного струму. ПЧ перетворює DC напругу назад в змінну напругу для двигуна змінного струму. До клем «PB» та «-» проміжного ланцюга DC підключають гальмівний резистор. Планується встановити частотно-регульований привід на насос типу Д-630-90. Техніко-економічне обґрунтування впровадження частотного перетворювача.

Вихідні дані:

- потужність насосного агрегату – $P_{e/e} = 250$ кВт;
- час роботи насосу в поливний період – $t_{III} = 3350$ год;
- коефіцієнт використаної потужності електродвигуна – $k_{вик} = 0,70$.

Витрати електроенергії на рік розраховується по формулі:

$$Be/e = P_{e/e} \cdot t_{III} \cdot k_{вих}, \quad (4.6)$$

$$Be/e = 250 \cdot 3350 \cdot 0,7 = 586250 \text{ кВт год}$$

Економія електроенергії за рік розрахуємо так:

$$E_{e/e} = Be/e(баз) - Be/e(рег), \quad (4.7)$$

де $B_{e/e(баз)}$ – витрата електроенергії в нерегульованому режимі, кВт·год;

$B_{e/e(рег)}$ – витрата електроенергії в регульованому режимі, кВт·год.

$$E_{e/e} = 670000 - 586250 = 83750 \text{ кВт·год.}$$

Економія електроенергії на рік від впровадження проекту розраховуємо по формулі:

$$\Delta E = E_{e/e} \cdot C_{e/e}, \quad (4.8)$$

де $E_{e/e}$ – економія електроенергії у рік, кВт·год;

$C_{e/e}$ – ціна за кВт·год.

$$\Delta E = 83750 \cdot 2,20 = 184250 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від впровадження проекту розраховуємо по формулі:

$$E = \Delta E + C_{\text{ФОП}} + D_{\text{ем}} + A_{\text{рег}} + A_{\text{баз}}, \quad (4.9)$$

де ΔE – економія електроенергії на рік від впровадження проекту, грн;

$C_{\text{ФОП}}$ – зменшення собівартості за рахунок економії фонду оплати праці з нарахуваннями (37%) у розрахунку на рік, грн;

$D_{\text{ем}}$ – вартість зворотних матеріалів при демонтажі старого обладнання, грн;

$A_{\text{рег}}$ – амортизаційні відрахування на рік у регульованому періоді, грн;

$A_{\text{баз}}$ – амортизаційні відрахування у нерегульованому періоді, грн.

$$E = 184250 + 4049 + 0 + 500 + 100 = 188699 \text{ грн.}$$

Термін окупності заходу розраховуємо по формулі:

$$T_{\text{ок}} = K/E \quad (4.10)$$

де K – повна вартість реалізації заходу з монтажними та пуско-налагоджувальними роботами без ПДВ, грн;

E – економічний ефект від впровадження проекту, грн.

$$T_{\text{ок}} = 266210/188699 = 1,4 \text{ рік}$$

Крім економії електроенергії до додаткових позитивних факторів застосування електроприводу, що регулюється, можна також віднести наступне:

- зменшення аварійності на водомережі за рахунок виключення поштовхів та гідроударів при регулюванні і плавному пуску чи зупинці агрегатів;
- зменшення зносу обладнання;
- збільшення моторесурсу насосних агрегатів і запірної арматури.

Економічний ефект від впроваджуваних ЧРЕП. Наступним етапом є визначення економічного ефекту від впровадження запропонованих заходів. Всього на підприємстві було запропоновано впровадити три заходи, щодо зменшення споживання електроенергії.

Економічний ефект від впровадження перетворювачів частоти:

- зниження витрат води до 5% і зменшення прихованих витоків за рахунок сталості тиску в мережі і зняття надлишкового напору;
- скорочення обсягу експлуатаційних, питомих капітальних та ремонтних витрат;
- забезпечується надійна робота зі «слабкими» мережами електропостачання і поганою якістю електроенергії; стабільна робота в широкому діапазоні напруги мережі живлення і висока стійкість при провалах

напруги живлення;

- економія електричної енергії завдяки оптимізації роботи насосних агрегатів становить 83750 кВт·год (повністю виключити споживання реактивної потужності з електромережі);
- збільшення терміну служби обладнання в 1,5-2 рази;
- терміни окупності інвестицій не перевищують півтора роки;
- економічний ефект склав 188699 грн.

Розраховано споживання електроенергії насосною станцією до впровадження заходу щодо зменшення споживання і після впровадження заходу, та побудовано гістограму (рис. 4.3). В таблиці 4.2 зведені основні економічні показники запропонованого заходу.

Таблиця 4.2 – Економічні показники запропонованого заходу

Захід	Економія електроенергії кВт·год	Економія, грн	Капіталовкладення грн	Термін окупності, роки
Встановлення ЧПна насос типу Д 630/90	83750	188699	266210	1,4

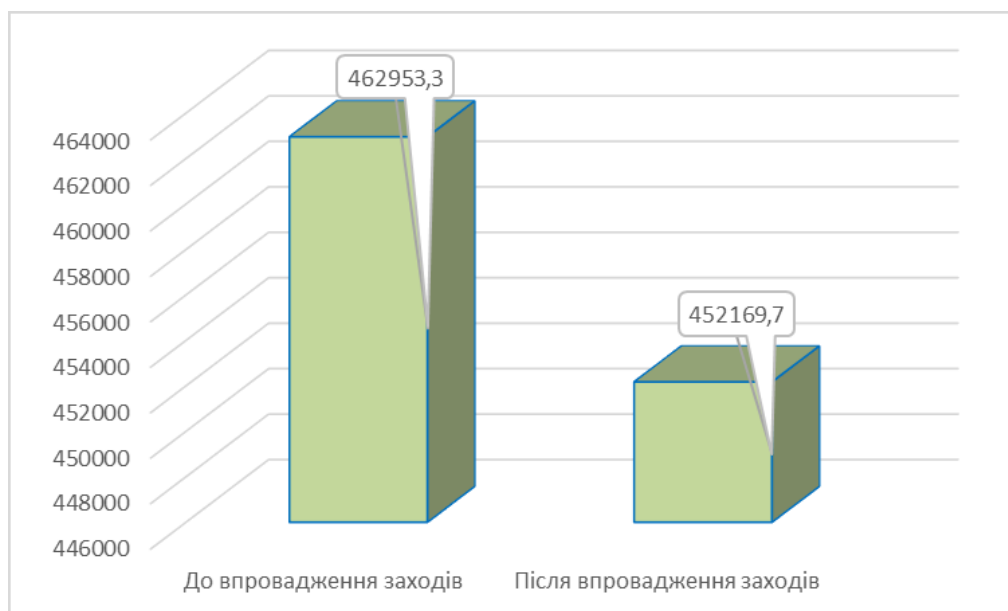


Рисунок 4.3 – Споживання електроенергії до і після впровадження заходів

На рисунку 4.4 зображено гістограму з порівнянням капіталовкладень при реалізації запропонованого заходу.

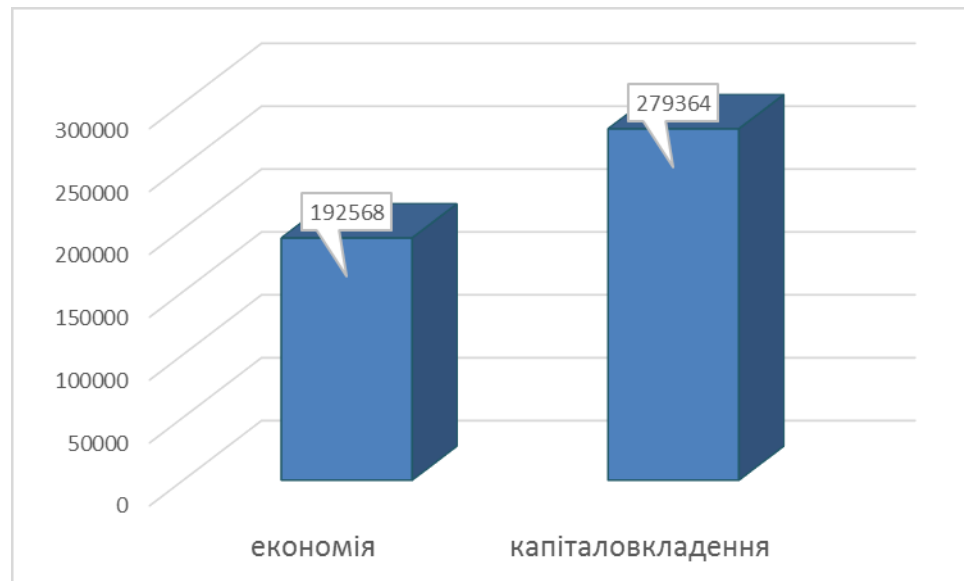


Рисунок 4.4 – Капіталовкладення при реалізації запропонованого заходу

Таким чином за рахунок реалізації запропонованих заходів, щодо підвищення ефективності роботи електричного обладнання, обсяги споживання електроенергії насосною станцією знизяться, в грошових одиницях ця величина складає 268320 грн на рік.

4.2 Питання, пов'язані з охороною праці

Мікроклімат виробничих приміщень визначається поєднанням температури, вологості, рухливості повітря, температури оточуючих поверхонь і їх тепловим випромінюванням. Параметри мікроклімату визначають теплообмін організму людини і справляють істотний вплив на функціональний стан різних

систем організму, самопочуття, працездатність і здоров'я. Температура у виробничих приміщеннях є одним з провідних чинників, що визначають метеорологічні умови виробничого середовища. Високі температури мають негативний вплив на здоров'я людини. Робота в умовах високої температури супроводжується інтенсивним потовиділенням, що призводить до зневоднення організму, втрати мінеральних солей і водорозчинних вітамінів, викликає серйозні і стійкі зміни в діяльності серцево-судинної системи, збільшує частоту дихання, а також впливає на функціонування інших органів і систем - послаблюється увага, погіршується координація рухів, уповільнюються реакції і т.д.

Тривалий вплив високої температури, особливо в поєднанні з підвищеною вологістю, може призвести до значного накопичення тепла в організмі (гіпертермії). При гіпертермії спостерігається головний біль, нудота, блювота, часом судоми, падіння артеріального тиску, втрата свідомості. Під шкідливим розуміється речовина, яка при контакті з організмом людини викликає виробничі травми, професійні захворювання або відхилення у стані здоров'я. Класифікація шкідливих речовин і загальні вимоги безпеки введені ГОСТ 12.1.007-76.

Ступінь і характер викликаних речовиною порушень нормальної роботи організму залежить від шляху потрапляння в організм, дози, часу впливу, концентрації речовини, його розчинності, стану сприймаючої тканини й організму в цілому, атмосферного тиску, температури й інших характеристик навколишнього середовища. Наслідком дії шкідливих речовин на організм можуть бути анатомічні пошкодження, постійні або тимчасові розлади й комбіновані наслідки. Багато сильно діючі шкідливі речовини викликають в організмі розлад нормальної фізіологічної діяльності без помітних анатомічних пошкоджень, впливів на роботу нервової і серцево-судинної систем, на загальний обмін речовин і т.п. Шкідливі речовини потрапляють в організм через органи дихання, шлунково-кишковий тракт і через шкірний покрив. Найбільш ймовірно

проникнення в організм речовин у вигляді газу, пари та пилю через органи дихання (близько 95% всіх отруень).

Виділення шкідливих речовин у повітряне середовище можливо при проведенні технологічних процесів і виконання робіт, пов'язаних із застосуванням, зберіганням, транспортуванням хімічних речовин і матеріалів, їх здобиччю і виготовленням.

Пил є найбільш поширеним несприятливим фактором виробничого середовища, Численні технологічні процеси та операції в промисловості, на транспорті, в сільському господарстві супроводжуються утворенням і виділенням пилю, її впливу можуть піддаватися великі контингенти працюючих.

Допустимі шумові характеристики робочих місць регламентуються ГОСТ 12.1.003-83 "Шум, загальні вимоги безпеки" (зміна І.Ш.89) і Санітарними нормами допустимих рівнів шуму на робочих місцях (СН 3223-85) зі змінами та доповненнями від 29.03.1988 року № 122-6/245-1. За характером спектра шуми поділяються на широкополосні і тональні. За часовими характеристиками шуми поділяються на постійні та непостійні. У свою чергу непостійні шуми поділяються на коливні в часі, переривчасті і імпульсні. За характером спектра вібрація підрозділяється на вузькосмугову і широкосмугову; по частотного складу – на низькочастотну з переважанням максимальних рівнів у октавних смугах 8 і 16 Гц, середньо частотну – 31,5 і 63 Гц, високочастотну – 125, 250, 500, 1000 Гц – для локальної вібрації; для вібрації робочих місць – відповідно 1 та 4 Гц, 8 і 16 Гц, 31,5 і 63 Гц.

ВИСНОВКИ

В представленій роботі було розглянуто та запропоновано раціональний спосіб регулювання обертів електроприводу насосного агрегату на основі асинхронного двигуна.

Аналіз енерговитрат показав, що найбільшими енергоспоживачами є насосні агрегати водорозподільної групи (до 82 %).

Рекомендується регулювати частоту обертання за допомогою приводу на основі перетворювача частоти (ПЧ), який дозволяє регулювати частоту обертів у широкому діапазоні. При невеликому діапазоні регулювання частоти обертання доцільно застосовувати асинхронний електропривод з регулюванням напруги статора.

У роботі було проаналізовано послідовність визначення механічних характеристик насосних агрегатів для комплексної оцінки економічної ефективності роботи насосних агрегатів. Характеристики насосного агрегату використовували для розрахунку енергетичних і економічних характеристик регульованого електроприводу (РЕП) на основі асинхронних двигунів (АД). Для обліку недоліків існуючих методик по оцінці економічної ефективності енергозбереження проаналізована модель оцінки економічної ефективності роботи АД у складі регульованого електроприводу насосного агрегату, яка дає можливість порівнювати економічний ефект від впровадження регульованого електроприводу замість нерегульованого в насосні агрегати.

Для застосування частотного управління необхідно використовувати загальноприйнятий закон регулювання частоти обертання. Прогнозована економія спожитої електроенергії при впровадженні РЕП досягає 30 %.

Визначено доцільність використання РЕП з встановленням ЧП, прораховано потужність ЧП та вибрано модель для встановлення на найбільш відповідний АД, економічний ефект і термін окупності. Для всіх заходів було

проведено економічне обґрунтування і в разі їх впровадження передбачається економія електричної енергії, яка становить понад 90 МВт·год, економічний ефект може скласти 268 тис. грн (відносно однієї машини близько 12 %), терміни окупності інвестицій не перевищують двох років. Крім того, застосування регульованого електроприводу дозволить також зменшити витрати води та продовжити ресурс насосів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. *Інформація* щодо прогнозу динаміки електроспоживання по Україні до 2025 року. Запит НКРЕКП до Держенергонагляду від 01.08.2016 № 7716/17.1/7316.
2. *Циганенко Б.В.* Впровадження електричних мереж напругою 20 кВ в енергосистемі України // *Енергетика та електрифікація*. — 2015. — № 4. — С. 10—13.
3. Якубчик, П. П. Насоси и насосні установки [Текст] / П. П. Якубчик. СПб: ПГУПС, 1997. — 107 с.
4. Загірняк, М. В. Електричні машини [Текст] : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невалін. — 2-ге вид., переробл. і доповн. — К. : Знання, 2009. — 399 с. — ISBN 978-966-336-644-6.
5. Шлипченко, З. С. Насоси, компресори, вентиляція [Текст] / З. С. Шлипченко — К. Техніка, 1987. — 968 с. — ISBN 7-4126-7431-5.
6. Иванов, И. И. Электротехника [Текст] : підручник / И. И. Иванов, А. Ф. Лукин. — К. : Лань, 2002. — 192 с. — ISBN 8-8114-0460-3.
7. Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходушных установках [Текст] / Б. С. Лезнов. — К. : Вища шк., 2006. — 360 с.
8. Онищенко, Г. Б. Электропривод турбомеханизмов [Текст] / Г. Б. Онищенко, М. Г. Юньков. — К. : Энергия, 1972. — 240 с.
9. Автоматизованый электропривод [Текст] : під ред. Н. Ф. Иллинского, М. Г. Юнькова. — К. : Вища шк., 1990. — 544 с.
10. *Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчёт.* / А.С. Овчаренко, М.Л. Рабинович - К.:Техника, 1985. — 279 с.
11. Москаленко, В. В. Электрический привод [Текст]: Навчальний

посібник / В. В. Москаленко. – К. : Майстерність, 2000. – 368 с.

12. Лезнов, Б. С. Современные проблемы использования регулируемого электропривода в насосных установках [Текст] / Б. С. Лезнов // Журнал. – 2006. – № 11. – ч. 2. – С. 2-5.

13. *Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила.* / Видавництво: ДП "НТУКЦ" АсЕлЕнерго, Київ, 2003 р.

14. Шкердин, Д. Г. Преобразователи частоты в энергосберегающем поводе насосов [Текст] / Д. Г. Шкердин // Журнал. – 2004. – №7. – С. 29-32.

15. Технологія енергозбереження в насосах [Електронний ресурс] / Електронний журнал енергосервісної компанії «Енергетичні системи» – №6. – Режим доступу : \WWW/ URL: http://esco-ecosys.narod.ru/2005_6/art03.htm. – 10.09.2019 р. – Загол. з екрану.

16. Тютєва, П. В. Економічна ефективність регульованого електроприводу при обліку енергетичних характеристик асинхронного двигуна [Текст] / П. В. Тютєва, О. О. Муравльова // Електромеханічні перетворювачі енергії : Праці міжнар. науково-практ. конф. – 2007. – С. 80- 83.

17. Муравльова, О. О. Енергозбереження насосного агрегату при використанні асинхронного регульованого електроприводу [Текст] / О. О. Муравльова // Автоматизований електропривод : Праці V міжнарконференції з автоматизованого електроприводу. – 2007. – С. 467-470.

18. Чернишов, А. Ю. Расчет характеристик электроприводов переменного тока [Текст] : Навчальний посібник / А. Ю. Чернишов, І. А. Чернишов. – Томськ : Томський політехнічний університет, 2005. – 136 с.

19. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями [Текст] : Навчальний посібник / А. А. Усольцев. СПб . : СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

20. Тютєва, П. В. Оцінка економічної ефективності асинхронного регульованого електроприводу насосних агрегатів [Текст] / П. В. Тютєва,

О. О. Муравльова // Звістки вузів. Електромеханіка. – 2009. – №2. – С. 61-64.

21. Муравльова, О. О. Використання енергетично ефективних двигунів в регульованому приводі насосів [Текст] / П. В. Тютєва, О. О. Муравльова // Водопостачання та санітарна техніка. – 2008. – № 5. – С. 29-33.

22. Тютєва, П. В. Енергоефективні асинхронні двигуни для насосних агрегатів [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / П. В. Тютєва. – Томск, 2010. – 215 с.

23. Асинхронные двигатели серии 4А [Текст] : Довідник / А. Е. Кравчик, М. М. Шлаф, В. І. Афонін, Е. А. Соболенская. – М. : Енергоіздат, 1982. – 504 с.

24. Економічні та технологічні аспекти енергоресурсозбереження за рахунок широкомасштабного впровадження регульованого електроприводу [Електронний ресурс] / ЕСКО – №6. – Режим доступу : \WWW/ URL: http://esco-ecosvs.narod.ru/2005_6/art11.htm. – 10.11.2019 р. – Загол. з екрану.

25. Козлов, М. Г. Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемыми приводами [Текст] / М. Г. Козлов, А. Н Чистяков // Сучасні технології автоматизації. – 2001. – №1. – С. 76-82

26. Застосування частотно-регульованого електроприводу ефективно рішення проблеми енергозбереження на об'єктах водопостачання і вентиляції [Електронний ресурс] / Вісник енергозбереження. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://energosber.74.ru/Vestnik/22003/20310.htm/> – 20.11.2019 р. – Загол. з екрану.

ДОДАТОК

Демонстраційні матеріали до магістерської роботи