

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

бакалавр

на тему: «Розробка енергоефективного електропривода для насосної
установки з використанням частотного регулювання»

КРБ.14ЕЕбд_41.09.00.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
*«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
спеціальності 141
*«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
ступеня вищої освіти *бакалавр*
групи *141ЕЕбд_41*
ЯНОВИЧ Данііл

Керівник: канд. техн. наук, доцент
БИЧКОВ Ярослав

Полтава – 2026 року

ВСТУП

У сучасних умовах зростання вартості електричної енергії та підвищення вимог до ефективності технологічного обладнання особливої актуальності набуває впровадження енергоощадних електроприводів у насосних установках. Насосне обладнання широко застосовується у системах водопостачання, промисловості, сільському господарстві, теплоенергетиці та комунальному господарстві. Значна частина таких установок працює тривалий час протягом доби, тому навіть незначне підвищення ефективності їх роботи дозволяє отримати помітну економію електроенергії [1].

Насосні установки належать до найбільш поширених споживачів електричної енергії у технологічних процесах, пов'язаних із транспортуванням рідин. Їх робота зазвичай характеризується змінним навантаженням, оскільки потреба у воді протягом доби може істотно змінюватися залежно від режиму роботи споживачів, технологічного процесу або сезонних факторів. У таких умовах електропривод повинен не лише забезпечувати необхідну продуктивність і напір, а й адаптуватися до фактичних режимів водоспоживання без надмірних енергетичних втрат.

Традиційні насосні установки здебільшого оснащуються асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором, які підключаються безпосередньо до електричної мережі. Такий спосіб живлення є простим і надійним, однак він не забезпечує плавного регулювання продуктивності насоса. У випадку зміни водоспоживання регулювання подачі часто здійснюється за допомогою дросельних засувок або періодичного вмикання і вимикання насосного агрегату. Це призводить до підвищених гідравлічних втрат, збільшення механічного зношування обладнання, виникнення гідроударів та нерационального використання електроенергії.

Крім того, прямий пуск асинхронного електродвигуна супроводжується значними пусковими струмами, які можуть у декілька разів перевищувати номінальне значення. Для двигуна насосної установки потужністю 7,5 кВт кратність пускового струму становить $7,5 I_n$, що створює додаткове

навантаження на електричну мережу, комутаційну апаратуру та обмотки двигуна. Часті пуски і зупинки негативно впливають на ресурс електродвигуна, насоса, муфт, трубопроводів і запірної арматури. Тому одним із важливих напрямів модернізації є впровадження систем плавного пуску та регулювання швидкості обертання.

Одним із найбільш ефективних технічних рішень для підвищення енергоефективності насосних установок є застосування частотно-регульованого електропривода. Зміна частоти живлення асинхронного двигуна дозволяє плавно регулювати частоту обертання насоса відповідно до фактичної потреби у воді. Для відцентрових насосів це має особливе значення, оскільки споживана потужність змінюється пропорційно кубу швидкості обертання. Тому навіть невелике зниження швидкості може забезпечити суттєве скорочення електроспоживання.

Важливою перевагою частотно-регульованого електропривода є покращення експлуатаційних характеристик насосної установки. Плавний розгін і зупинка зменшують механічні удари, обмежують пускові струми, знижують імовірність аварійних ситуацій та підвищують довговічність обладнання. Крім того, сучасні перетворювачі частоти мають вбудовані функції захисту від перевантаження, короткого замикання, перегріву, зникнення фази, зниження або підвищення напруги, що підвищує загальну надійність електропривода.

Актуальність теми бакалаврської роботи полягає в необхідності розробки технічного рішення, спрямованого на підвищення енергетичної ефективності насосної установки за рахунок впровадження частотного регулювання асинхронного електропривода. Запропонована модернізація дозволяє не лише зменшити витрати електроенергії, але й покращити умови пуску двигуна, знизити пускові струми, зменшити динамічні навантаження на трубопровідну мережу та підвищити надійність роботи всієї системи.

Мета роботи — розробка енергоефективного електропривода для насосної установки з використанням частотного регулювання, що забезпечує зниження електроспоживання, плавне керування продуктивністю та підвищення надійності роботи насосного агрегату.

Об'єкт роботи — насосна установка, призначена для транспортування води з приймальної ємності до споживача.

Предмет роботи — електропривод насосної установки на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором та системи частотного керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

проаналізувати технічний стан насосної установки та особливості її роботи;

розглянути існуючі способи регулювання продуктивності насосних агрегатів;

обґрунтувати доцільність застосування частотно-регульованого електропривода;

виконати розрахунок основних параметрів електродвигуна насосної установки;

побудувати механічні характеристики асинхронного двигуна;

розробити систему керування електроприводом із використанням перетворювача частоти;

підібрати комутаційну, пускорегулювальну та захисну апаратуру;

оцінити очікувану економію електроенергії та економічну доцільність модернізації;

розглянути вимоги охорони праці під час експлуатації електропривода насосної установки.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання запропонованого технічного рішення для модернізації насосних установок у системах водопостачання підприємств, агропромислових об'єктів і комунального господарства. Очікуване скорочення електроспоживання становить близько 35 %, що підтверджує доцільність впровадження частотного регулювання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

1.1 Особливості роботи насосних установок у системах водопостачання

Насосні установки є одним із найбільш поширених видів технологічного обладнання, що використовується для транспортування рідин у системах водопостачання, тепlopостачання, промислового виробництва, сільського господарства та комунального господарства. Їх основне призначення полягає у забезпеченні необхідної подачі рідини та створенні заданого напору в трубопровідній мережі. Надійність і ефективність роботи насосної установки значною мірою залежать від правильного вибору насоса, електродвигуна, способу керування та режиму експлуатації.

У сучасних умовах питання енергозбереження в електроприводних системах має особливе значення. За даними Міжнародного енергетичного агентства, модернізація електродвигунних систем, зокрема насосів, вентиляторів і компресорів, є одним із важливих напрямів підвищення промислової енергоефективності [1], а застосування регульованих електроприводів дає змогу отримувати додаткову економію в системах зі змінним навантаженням.

Насосні установки працюють у різних режимах, які залежать від характеру водоспоживання. У системах подачі води навантаження рідко залишається постійним. Протягом доби можуть спостерігатися години максимального, середнього та мінімального споживання. Наприклад, у ранковий і вечірній періоди витрата води збільшується, а в нічний час — зменшується. Якщо насос працює з постійною швидкістю обертання, то його продуктивність не завжди відповідає фактичній потребі споживача. У такому випадку частина енергії витрачається неефективно.

Для забезпечення раціонального використання енергоресурсів на підприємствах доцільно застосовувати системний підхід до керування енергоспоживанням. Міжнародний стандарт ISO 50001 визначає енергетичний

менеджмент як основу для постійного поліпшення енергетичних показників, зокрема ефективності використання, споживання та витрат енергії. У контексті насосних установок це означає необхідність не лише вибору енергоефективного двигуна, а й оптимізації способу його керування відповідно до змінного технологічного навантаження [2].

Типова насосна установка складається з таких основних елементів: приймальної ємності, всмоктувального трубопроводу, насоса, електродвигуна, напірного трубопроводу, запірної та регулювальної арматури, контрольно-вимірювальних приладів і системи керування. Основним споживачем електричної енергії в такій системі є електродвигун насоса. У більшості випадків для приводу насосів застосовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором. Вони мають просту конструкцію, високу надійність, порівняно невисоку вартість і не потребують складного технічного обслуговування.

Разом із тим традиційне підключення асинхронного двигуна безпосередньо до мережі має суттєвий недолік — відсутність можливості плавного регулювання частоти обертання. Двигун працює практично з постійною швидкістю, яка визначається частотою живлення мережі та кількістю пар полюсів. Для мережі 50 Гц двополюсний асинхронний двигун має синхронну частоту обертання 3000 об/хв, а реальна швидкість ротора з урахуванням ковзання становить близько 2900 об/хв.

Енергоефективність електродвигунів оцінюється відповідно до міжнародної класифікації ІЕ. Стандарт ІЕС 60034-30-1 встановлює класи енергоефективності для одношвидкісних електродвигунів змінного струму, що дає змогу порівнювати двигуни за показниками втрат і ККД [3]. Водночас навіть використання двигуна з високим ККД не забезпечує максимальної економії, якщо насос працює в нераціональному режимі, а регулювання продуктивності здійснюється механічним способом.

Для теми даної бакалаврської роботи важливим є те, що насосна установка призначена для транспортування води з приймальної ємності до споживача. Необхідна продуктивність становить 80 м³/год, розрахунковий напір – 0,2 МПа,

а привід основного насоса виконується на базі асинхронного електродвигуна потужністю 7,5 кВт із частотою обертання 2900 об/хв. Такі параметри є типовими для насосних агрегатів невеликої та середньої потужності, де впровадження частотного регулювання може дати відчутний енергетичний ефект.

1.2 Основні способи регулювання продуктивності насосних агрегатів

Продуктивність насосної установки повинна відповідати поточній потребі споживача у воді. Якщо подача насоса перевищує необхідну витрату, у системі виникає надлишковий тиск, зростають гідравлічні втрати, збільшується навантаження на трубопроводи та запірну арматуру. Якщо ж подача недостатня, система не забезпечує необхідного технологічного режиму.

У практиці експлуатації насосних установок використовують кілька основних способів регулювання продуктивності:

- дроселювання потоку за допомогою засувки або клапана;
- перепуск частини води через байпасну лінію;
- періодичне вмикання та вимикання насоса;
- зміна кількості працюючих насосів;
- регулювання швидкості обертання електродвигуна.

Найпростішим способом є дроселювання, тобто часткове перекриття напірної лінії за допомогою засувки. При цьому насос продовжує працювати з незмінною швидкістю, а зменшення витрати досягається штучним збільшенням гідравлічного опору трубопроводу. Такий спосіб є простим з точки зору реалізації, але енергетично невигідним. Електродвигун продовжує споживати майже таку саму потужність, а надлишкова енергія втрачається на подолання додаткового опору.

Перепуск частини рідини через байпасну лінію також не є енергоефективним. Насос перекачує більший об'єм води, ніж потрібно споживачеві, а частина потоку повертається назад у приймальну ємність або всмоктувальну лінію. У цьому випадку електроенергія витрачається на переміщення води, яка фактично не використовується за призначенням.

Періодичне вмикання та вимикання насоса дозволяє частково узгодити роботу установки з потребами споживача. Проте такий спосіб має низку недоліків. Часті пуски асинхронного двигуна супроводжуються значними пусковими струмами, які можуть у кілька разів перевищувати номінальний струм. Це створює додаткове навантаження на електричну мережу, комутаційну апаратуру, обмотки двигуна та механічні елементи насоса. Крім того, при різкій зупинці або запуску насоса можуть виникати гідроудари в трубопровідній системі.

Зміна кількості працюючих насосів є ефективною для великих насосних станцій, де встановлено кілька агрегатів. Проте цей спосіб забезпечує лише ступінчасте регулювання продуктивності. Якщо споживання води змінюється плавно, то ступінчасте вмикання насосів не завжди дозволяє точно підтримувати заданий тиск або витрату.

Найбільш раціональним способом регулювання продуктивності відцентрового насоса є зміна швидкості обертання його робочого колеса. Саме цей принцип реалізується у частотно-регульованому електроприводі. Регламент Європейської Комісії щодо екодизайну електродвигунів і перетворювачів частоти встановлює вимоги до енергоефективності таких пристроїв, що підтверджує актуальність їх застосування в сучасних електроприводних системах [4].

Крім енергетичного ефекту, застосування частотного перетворювача підвищує якість керування насосним агрегатом. За наявності датчика тиску або витрати система може працювати в автоматичному режимі, змінюючи частоту обертання електродвигуна відповідно до фактичних потреб споживача. У результаті насос не працює постійно на максимальній продуктивності, а підтримує задані параметри системи з мінімально необхідними витратами електроенергії.

Порівняльну характеристику основних способів регулювання продуктивності насосних установок наведено в таблиці 1.1.

Аналіз способів регулювання показує, що традиційні методи здебільшого пов'язані або з додатковими втратами енергії, або з підвищеним зношуванням

обладнання. Частотне регулювання дає можливість змінювати продуктивність насоса без створення зайвого гідравлічного опору, що робить його найбільш доцільним для енергоефективної модернізації насосної установки.

Таблиця 1.1 — Порівняння способів регулювання продуктивності насосної установки

Спосіб регулювання	Переваги	Недоліки	Енергоефективність
Дроселювання засувкою	Проста реалізація, низька вартість	Значні гідравлічні втрати, підвищене навантаження на арматуру	Низька
Байпасне регулювання	Просте технічне виконання	Частина води перекачується без корисного використання	Низька
Періодичне вмикання/вимикання	Просте керування	Великі пускові струми, гідроудари, зношування обладнання	Середня
Зміна кількості насосів	Доцільно для багатонасосних станцій	Ступінчасте, а не плавне регулювання	Середня
Частотне регулювання	Плавна зміна подачі, зниження	Вища початкова	Висока

	пускових струмів, економія електроенергії	вартість обладнання	
--	--	------------------------	--

1.3 Переваги застосування частотно-регульованого електропривода

Застосування частотно-регульованого електропривода в насосній установці забезпечує комплексний технічний та економічний ефект. Його переваги не обмежуються лише економією електроенергії. Частотний перетворювач також покращує умови пуску, зупинки, регулювання та захисту електродвигуна.

Однією з головних переваг є плавний пуск двигуна. При прямому підключенні асинхронного двигуна до мережі пусковий струм може у декілька разів перевищувати номінальний. Для двигуна потужністю 7,5 кВт, який розглядається в роботі, кратність пускового струму становить $7,5I_n$. Це означає, що при прямому пуску виникає значне короткочасне навантаження на електричну мережу та апаратуру керування. Частотний перетворювач дозволяє поступово збільшувати частоту й напругу живлення, завдяки чому пусковий струм суттєво обмежується.

Другою важливою перевагою є зменшення механічних навантажень. Плавний розгін і зупинка насоса знижують ударні навантаження на вал двигуна, муфту, підшипники, робоче колесо насоса та трубопровідну систему. Це особливо важливо для систем водопостачання, де різка зміна швидкості потоку може спричинити гідроудари.

Третьою перевагою є можливість автоматичного підтримання заданого тиску або витрати. Для цього до частотного перетворювача підключається датчик тиску або витрати, сигнал з якого використовується для регулювання швидкості двигуна. У таких системах частотний перетворювач може працювати за принципом замкненого контуру керування. Якщо тиск у мережі знижується,

швидкість двигуна збільшується. Якщо тиск перевищує задане значення, частота обертання зменшується.

Виробники сучасних електроприводів для насосів зазначають, що регулювання швидкості дає змогу зменшити витрати енергії та води, а також підтримувати стабільний тиск у системі за допомогою сигналів від датчиків [7]. Такий підхід є особливо доцільним для насосних установок із нерівномірним водоспоживанням.

Четвертою перевагою є розширення функцій захисту. Більшість сучасних частотних перетворювачів мають вбудований захист від перевантаження, короткого замикання, зникнення фази, перегріву, зниження або підвищення напруги. Це дозволяє підвищити надійність роботи електропривода та зменшити ризик аварійного виходу обладнання з ладу.

П'ятою перевагою є можливість інтеграції в автоматизовану систему керування. Частотний перетворювач може працювати спільно з програмованим логічним контролером, датчиками, панеллю оператора, системою диспетчеризації або віддаленого моніторингу. Це відкриває можливість не лише локального, а й дистанційного керування насосною установкою.

З точки зору енергоефективності важливим є також правильний вибір самого перетворювача частоти. Стандарт ІЕС 61800-9-2 визначає підходи до оцінювання енергоефективності силових електроприводних систем із регульованою швидкістю, включаючи втрати в перетворювачі, двигуні та системі в цілому [8]. Тому при модернізації насосної установки слід оцінювати не лише потужність перетворювача, а й його ККД, допустимий струм, перевантажувальну здатність, функції керування та захисту.

1.4 Вибір напряму модернізації насосної установки

Аналіз режимів роботи насосних установок показує, що найбільші втрати електроенергії виникають у випадках, коли насос працює з постійною швидкістю, а регулювання подачі здійснюється механічним способом. Для заданої установки це особливо важливо, оскільки насос призначений для

транспортування води з прийнятною ємністю до споживача, а фактична потреба у воді може змінюватися залежно від режиму роботи системи.

Вихідні дані до роботи передбачають використання асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором номінальною потужністю 7,5 кВт, частотою обертання 2900 об/хв, ККД 87,5 % і коефіцієнтом потужності $\cos\varphi = 0,88$. Живлення здійснюється від трифазної мережі 380 В, 50 Гц. Необхідна продуктивність насосного агрегату становить 80 м³/год, а розрахунковий напір – 0,2 МПа.

Для такого об'єкта доцільним напрямом модернізації є впровадження частотного перетворювача, який забезпечить: плавне регулювання швидкості обертання двигуна; підтримання заданого тиску або витрати в системі; зменшення пускових струмів; зниження механічних і гідравлічних ударів; зменшення електроспоживання приблизно на 35 %; підвищення ресурсу насоса, двигуна та трубопровідної арматури; покращення умов експлуатації та технічного обслуговування.

У межах роботи розглянули модернізований електропривод як систему, що складається з таких основних елементів: автоматичного вимикача на ввіді; частотного перетворювача відповідної потужності; асинхронного електродвигуна 7,5 кВт; відцентрового насоса; датчика тиску або витрати; елементів ручного та автоматичного керування; засобів сигналізації та захисту.

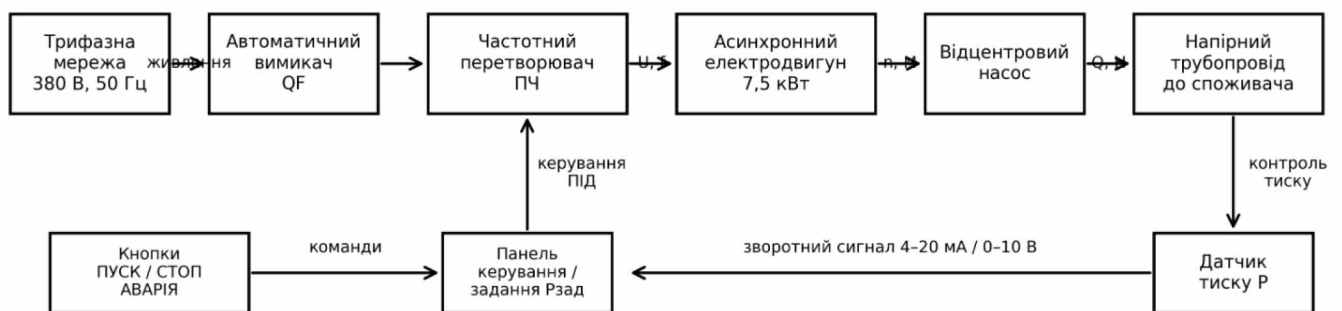


Рисунок 1.1 – Структурна схема частотно-регульованого електропривода насосної установки

Така структурна схема відображає замкнений принцип керування: частотний перетворювач отримує сигнал від датчика тиску, порівнює його із заданим значенням і змінює частоту живлення двигуна. У результаті насос працює не з постійною максимальною швидкістю, а відповідно до фактичної потреби системи.

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто особливості роботи насосних установок у системах водопостачання та проаналізовано основні способи регулювання їх продуктивності. Встановлено, що традиційні методи, зокрема дроселювання, байпасне регулювання та періодичне вмикання насоса, мають суттєві недоліки, пов'язані з підвищеними втратами електроенергії, зношуванням обладнання та виникненням небажаних динамічних навантажень.

Показано, що найбільш ефективним способом регулювання продуктивності відцентрового насоса є зміна швидкості обертання його робочого колеса. Цей принцип реалізується за допомогою частотно-регульованого електропривода, який дозволяє плавно змінювати частоту обертання асинхронного двигуна відповідно до фактичної потреби у воді.

Обґрунтовано, що застосування частотного перетворювача для двигуна насосної установки потужністю 7,5 кВт дозволяє знизити пускові струми, підвищити плавність пуску та зупинки, зменшити гідравлічні удари, покращити захист електродвигуна та забезпечити економію електроенергії. Для заданої насосної установки очікуване скорочення електроспоживання становить приблизно 35 %.

На основі проведеного аналізу визначено напрям подальшої розробки — створення енергоефективної системи електропривода насосної установки з використанням частотного регулювання, автоматичного підтримання заданих параметрів тиску або витрати та відповідного вибору комутаційної, пускорегулювальної і захисної апаратури.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ ТА ВИМОГ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ

2.1 Опис об'єкта розробки

Об'єктом розробки в роботі є насосна установка, призначена для транспортування води з приймальної ємності до споживача. Така установка належить до електромеханічних систем безперервної дії, у яких електрична енергія за допомогою електродвигуна перетворюється на механічну енергію обертання вала насоса, а далі – на гідравлічну енергію потоку рідини.

Насосні установки такого типу широко застосовуються у системах водопостачання, технологічного водозабезпечення, агропромислового виробництва, комунального господарства та промислових об'єктів. Їх основним завданням є забезпечення необхідної подачі води при заданому напорі. При цьому робота насосного агрегату повинна бути стабільною, надійною та енергоефективною, особливо у випадках, коли споживання води змінюється протягом доби.

До складу насосної установки входять такі основні елементи: приймальна ємність; всмоктувальний трубопровід; відцентровий насос; асинхронний електродвигун; муфтове з'єднання між двигуном і насосом; напірний трубопровід; запірні та регульовальні арматури; контрольно-вимірювальні прилади; система керування та захисту електропривода.

Принцип роботи установки полягає в тому, що вода з приймальної ємності надходить до насоса через всмоктувальний трубопровід. Насос, який приводиться в обертання асинхронним електродвигуном, створює необхідний напір і подає воду до споживача через напірний трубопровід. Для контролю параметрів роботи системи можуть використовуватися манометри, датчики тиску, витратоміри, реле рівня та інші засоби автоматизації.

У цій роботі розглядається насосна установка з такими основними вихідними параметрами (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 — Вихідні дані насосної установки

Параметр	Позначення	Значення
Робоче середовище	-	вода
Продуктивність насосного агрегату	Q	80 м ³ /год
Розрахунковий напір / тиск	p	0,2 МПа
Тип електродвигуна	—	асинхронний, з короткозамкненим ротором
Номінальна потужність двигуна	P_n	7,5 кВт
Частота обертання двигуна	n_n	2900 об/хв
ККД електродвигуна	η	87,5 %
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,88
Кратність пускового струму	I_p / I_n	7,5
Напруга живлення	U	380 В
Частота мережі	f	50 Гц
Очікуване скорочення електроспоживання	-	близько 35 %

Розрахунковий напір у вихідних даних задано в одиницях тиску – 0,2 МПа. Для гідравлічних розрахунків його доцільно подати також у метрах водяного стовпа. Переведення виконується за формулою:

$$H = \frac{p}{\rho g} \quad (2.1)$$

де H – напір, м; p – тиск, Па; ρ – густина води, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для води приймаємо: $\rho=1000$ кг/м³, $g=9,81$ м/с².

Тоді: $H = 20,4$ м.

Отже, розрахунковий напір насосної установки становить приблизно 20,4 м водяного стовпа. Це значення надалі може бути використане для перевірки відповідності насоса заданим умовам роботи та визначення гідравлічної потужності.

2.2 Технічна характеристика насосного агрегату

Основними параметрами, що визначають роботу насосного агрегату, є подача, напір, потужність, частота обертання, ККД та характер зміни навантаження. Для відцентрового насоса подача залежить від частоти обертання робочого колеса, а споживана потужність істотно змінюється при зміні швидкості.

Задана продуктивність насосного агрегату становить: $Q=80 \text{ м}^3/\text{год}$.

Для виконання розрахунків переведемо продуктивність у $\text{м}^3/\text{с}$: $Q=0,0222 \text{ м}^3/\text{с}$.

Гідравлічна потужність насоса визначається за формулою:

$$P_{\Gamma} = \rho g Q H \quad (2.2)$$

де P_{Γ} – гідравлічна потужність, Вт; ρ — густина води, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; Q – подача, $\text{м}^3/\text{с}$; H – напір, м.

Підставляємо значення: $P_{\Gamma}=4444 \text{ Вт}$. Отже, $P_{\Gamma}\approx 4,44 \text{ кВт}$

Гідравлічна потужність менша за номінальну потужність електродвигуна, оскільки в реальній насосній установці мають місце втрати в насосі, електродвигуні, муфтовому з'єднанні та трубопроводній мережі. Тому вибір електродвигуна номінальною потужністю 7,5 кВт для заданого насосного агрегату є технічно обґрунтованим.

Орієнтовну потужність на валу насоса можна визначити за формулою:

$$P_{\text{В}} = \frac{P_{\Gamma}}{\eta_{\text{н}}} \quad (2.3)$$

де $\eta_{\text{н}}$ – ККД насоса.

Якщо прийняти орієнтовний ККД відцентрового насоса $\eta_n=0,70$, тоді:
 $P_B=6,34$ кВт.

З урахуванням запасу потужності та можливих втрат у системі двигун потужністю 7,5 кВт відповідає заданим умовам експлуатації. Коефіцієнт завантаження двигуна при цьому можна оцінити як:

$$K_z = \frac{P_B}{P_n} \quad (2.4)$$

Коефіцієнт завантаження свідчить, що електродвигун не працюватиме з перевантаженням, але водночас буде достатньо завантаженим для ефективної роботи. Такий режим є прийнятним для насосного електропривода, оскільки забезпечує резерв потужності на випадок зміни гідравлічного опору трубопроводної мережі або короткочасного підвищення навантаження.

2.3 Вимоги до електропривода насосної установки

Електропривод насосної установки повинен забезпечувати надійну роботу насоса в заданому діапазоні продуктивності та напору. При цьому до нього висуваються як електротехнічні, так і технологічні вимоги.

Основними технічними вимогами до електропривода є:

- забезпечення необхідної механічної потужності на валу насоса;
- відповідність частоти обертання двигуна характеристиці насоса;
- можливість плавного пуску та зупинки;
- обмеження пускового струму;
- стабільна робота при змінному навантаженні;
- захист від перевантаження, короткого замикання, обриву фази та перегріву;
- можливість автоматичного керування за сигналом від датчика тиску або витрати;
- висока енергоефективність у режимах часткового навантаження;
- простота технічного обслуговування;
- безпечність експлуатації.

Важливою вимогою є відповідність електродвигуна режиму роботи насосного агрегату. Насосні установки зазвичай працюють у тривалому або повторно-змінному режимі, тому двигун повинен мати достатній тепловий запас і бути здатним працювати без перегрівання в умовах тривалого навантаження.

Для заданого двигуна номінальна механічна потужність становить 7,5 кВт. Номінальна кутова швидкість визначається за формулою:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} \quad (2.5)$$

Отримуємо, що $\omega_n = 303,4$ рад/с.

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (2.6)$$

Підставляючи значення, отримуємо: $M_n = 24,7$ Н·м

Отже, електродвигун повинен забезпечувати на валу номінальний момент близько 24,7 Н·м. При цьому система керування має забезпечити плавне наростання моменту під час пуску, щоб уникнути різких механічних навантажень на насос.

Оскільки насосна установка працює із водою, важливе значення має стабільність гідравлічного режиму. Електропривод повинен забезпечувати підтримання заданого тиску або витрати без різких коливань. Для цього доцільно використовувати замкнену систему автоматичного керування, у якій частотний перетворювач змінює швидкість двигуна залежно від сигналу датчика тиску.

Сучасні перетворювачі частоти для насосних застосувань мають спеціалізовані функції керування, зокрема підтримання тиску, захист від аварійних режимів, контроль роботи насоса та оптимізацію споживання енергії. Компанія Danfoss зазначає, що насосні електроприводи з регулюванням швидкості призначені для водопостачання, водовідведення, зрошення та

промислових насосних систем, а також забезпечують розширені функції керування процесом [9].

З урахуванням цього в даній роботі основною вимогою до модернізованого електропривода є можливість плавної зміни частоти обертання електродвигуна відповідно до поточної потреби споживача у воді.

2.4 Обґрунтування вибору частотно-регульованого електропривода

Для заданої насосної установки найбільш доцільним технічним рішенням є використання частотно-регульованого електропривода. Його основу становлять асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором і перетворювач частоти, який змінює частоту та напругу живлення двигуна.

Частотне регулювання дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна за законом:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (2.7)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв; f — частота живлення, Гц; p – кількість пар полюсів.

Оскільки насос має відцентровий принцип дії, зменшення швидкості обертання призводить до зниження подачі, напору та споживаної потужності. Для таких насосів справедливі закони подібності, представлені в 1 розділі роботи:

Кубічна залежність потужності від швидкості обертання пояснює значний енергетичний ефект від застосування частотного регулювання. Якщо насос не потребує роботи на повній продуктивності, зменшення швидкості навіть на 10–20 % може дати суттєве скорочення споживаної потужності. У матеріалах АВВ щодо застосування регульованих електроприводів у насосних системах зазначається, що керування швидкістю є найбільш енергоефективним способом регулювання в насосних застосуваннях порівняно з дроселюванням або байпасом [11].

Для насосної установки, яка розглядається в роботі, очікуване зменшення електроспоживання становить близько 35 %. Це може бути досягнуто за рахунок того, що електродвигун не працюватиме постійно з максимальною частотою обертання, а його швидкість буде змінюватися відповідно до фактичного водоспоживання.

Крім зменшення електроспоживання, частотне регулювання забезпечує такі переваги: плавний пуск двигуна; обмеження пускового струму; зменшення гідроударів у трубопровідній системі; зниження механічних навантажень на насос; можливість автоматичного підтримання тиску; підвищення ресурсу електродвигуна та насоса; покращення якості керування технологічним процесом; можливість інтеграції в систему автоматизації.

Вибір перетворювача частоти повинен здійснюватися з урахуванням номінальної потужності двигуна, напруги живлення, номінального струму, перевантажувальної здатності, умов навколишнього середовища та наявності функцій насосного керування. Енергоефективність систем із регульованою швидкістю оцінюється відповідно до стандарту ІЕС 61800-9-2 [8], який визначає класи ефективності та методику оцінювання втрат у силових електроприводних системах.

Також актуальність застосування частотно-регульованих електроприводів підтверджується європейськими вимогами до екодизайну електродвигунів і перетворювачів частоти. Регламент ЄС 2019/1781 встановлює вимоги до енергоефективності електродвигунів і приводів зі змінною швидкістю, що свідчить про важливість комплексного підходу до зниження енергоспоживання електроприводних систем [4].

2.5 Структура модернізованої системи керування насосною установкою

Модернізована система керування насосною установкою повинна забезпечувати автоматичне регулювання роботи електродвигуна залежно від параметрів технологічного процесу. Основним регульованим параметром у такій системі може бути тиск у напірному трубопроводі або витрата води.

До складу модернізованої системи доцільно включити такі елементи: автоматичний вимикач; частотний перетворювач; асинхронний електродвигун 7,5 кВт; відцентровий насос; датчик тиску; кнопки місцевого керування «Пуск» і «Стоп»; аварійну кнопку вимкнення; засоби індикації режимів роботи; захисну апаратуру; за потреби – програмований логічний контролер.

Принцип роботи модернізованої системи полягає в тому, що оператор задає необхідне значення тиску або витрати. Датчик тиску, встановлений у напірному трубопроводі, передає сигнал на частотний перетворювач. Якщо фактичний тиск нижчий від заданого, перетворювач збільшує частоту живлення двигуна, внаслідок чого зростає швидкість обертання насоса і підвищується подача. Якщо тиск перевищує задане значення, частота живлення зменшується, а насос переходить у режим меншої продуктивності.

Функціональна структура системи керування насосною установкою представлено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Функціональну структуру системи керування насосною установкою

Такий спосіб керування дозволяє уникнути роботи насоса з надлишковою продуктивністю. У результаті зменшуються втрати електроенергії, знижується навантаження на трубопроводи та підвищується стабільність тиску в системі.

У цій структурі частотний перетворювач виконує відразу кілька функцій: живлення двигуна, регулювання швидкості, плавний пуск і зупинку, захист від аварійних режимів та підтримання заданого тиску.

Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано аналіз об'єкта розробки – насосної установки, призначеної для транспортування води з приймальної ємності до споживача. Розглянуто її основні конструктивні елементи, принцип роботи та вихідні технічні параметри.

Встановлено, що задана продуктивність насосного агрегату становить 80 м³/год, а розрахунковий тиск 0,2 МПа відповідає напору приблизно 20,4 м водяного стовпа. Розрахована гідравлічна потужність становить близько 4,44 кВт, а орієнтовна потужність на валу насоса з урахуванням ККД – близько 6,34 кВт. Це підтверджує доцільність використання асинхронного електродвигуна потужністю 7,5 кВт.

Проведено аналіз існуючого електропривода насосної установки. Визначено, що при прямому пуску двигуна номінальний струм становить приблизно 14,8 А, а пусковий струм може досягати 111 А. Такий режим створює підвищене навантаження на електричну мережу, комутаційну апаратуру та механічні елементи насосного агрегату.

Обґрунтовано, що найбільш доцільним напрямом модернізації є застосування частотно-регульованого електропривода. Його використання дозволяє плавно змінювати швидкість обертання електродвигуна, підтримувати заданий тиск або витрату, зменшувати пускові струми, знижувати механічні навантаження та забезпечувати очікуване скорочення електроспоживання приблизно на 35 %.

Таким чином, для подальших розрахунків і розробки приймається система електропривода на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором потужністю 7,5 кВт і частотного перетворювача, який забезпечує енергоефективне автоматизоване керування насосною установкою.

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Уточнення розрахункових параметрів насосного агрегату

У попередньому розділі було виконано загальний аналіз об'єкта розробки, визначено основні параметри насосної установки та обґрунтовано доцільність застосування частотно-регульованого електропривода. Для подальшого розрахунку електропривода необхідно узагальнити вихідні дані та уточнити параметри, які безпосередньо впливають на вибір електродвигуна, побудову його механічної характеристики та аналіз режимів роботи насосного агрегату.

Насосна установка призначена для транспортування води з приймальної ємності до споживача. Основними розрахунковими параметрами є продуктивність насоса, напір, гідравлічна потужність, потужність на валу насоса та параметри електродвигуна. У роботі насос приводиться в дію асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором потужністю 7,5 кВт і частотою обертання 2900 об/хв.

Вихідні параметри насосного агрегату наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Основні розрахункові параметри насосного агрегату

Параметр	Позначення	Значення
Робоче середовище	—	вода
Продуктивність насоса	Q	80 м ³ /год
Продуктивність у системі SI	Q	0,0222 м ³ /с
Розрахунковий тиск	p	0,2 МПа
Розрахунковий напір	H	20,4 м
Гідравлічна потужність	P_{Γ}	4,44 кВт
Орієнтовний ККД насоса	$\eta_{\text{н}}$	0,70
Потужність на валу насоса	$P_{\text{в}}$	6,34 кВт
Номінальна потужність двигуна	$P_{\text{н}}$	7,5 кВт

Коефіцієнт завантаження двигуна	K_3	0,85
------------------------------------	-------	------

Розрахункова потужність на валу насоса визначена за формулою:

$$P_B = P_T / \eta_n, \quad (3.1)$$

де P_T – гідравлічна потужність насоса, кВт; η_n – ККД насоса. Отримали, що $P_B = 6,34$ кВт.

Перевіримо відповідність номінальної потужності електродвигуна потужності, необхідній для приводу насоса: $P_n > P_B$; Таким чином, отримуємо $7,5 > 6,34$ кВт.

Отже, обраний електродвигун має достатню потужність для приводу насосного агрегату. Запас за потужністю становить: $\Delta P = P_n - P_B = 7,5 - 6,34 = 1,16$ кВт.

Коефіцієнт завантаження двигуна становить: $K_3 = P_B / P_n = 0,85$.

Отримане значення свідчить, що електродвигун працюватиме без перевантаження, але з достатнім рівнем використання встановленої потужності. Такий режим є доцільним для насосного електропривода, оскільки забезпечує резерв потужності на випадок збільшення гідравлічного опору трубопроводу, коливань напору або зміни технологічного режиму.

Під час розрахунку електропривода необхідно враховувати, що відцентровий насос має вентиляторну характеристику навантаження. Для таких механізмів момент опору приблизно пропорційний квадрату швидкості обертання, а споживана потужність – кубу швидкості. Ці залежності лежать в основі енергетичної ефективності частотного регулювання насосних установок [5, 13, 14].

3.2 Перевірка вибраного асинхронного електродвигуна за потужністю та режимом роботи

Для приводу насосного агрегату прийнято асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором. Такі двигуни широко застосовуються у насосних

установках завдяки простоті конструкції, високій надійності [10, 11, 12], відносно невеликій вартості та можливості роботи в тривалому режимі. Вимоги до номінальних режимів, характеристик і умов роботи обертових електричних машин регламентуються стандартом ІЕС 60034-1 [3], який поширюється на обертові електричні машини загального призначення.

Основні паспортні дані вибраного електродвигуна наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Паспортні дані асинхронного електродвигуна насосної установки

Параметр	Позначення	Значення
Тип двигуна	—	асинхронний, з короткозамкненим ротором
Номінальна потужність	P_n	7,5 кВт
Номінальна напруга	U_n	380 В
Частота мережі	f	50 Гц
Номінальна частота обертання	n	2900 об/хв
ККД	η	0,875
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,88
Кратність пускового струму	I_p/I_n	7,5
Режим роботи	—	тривалий / змінний насосний режим

Вибір двигуна за потужністю виконується з умови: $P_n \geq P_b$, де маємо $7,5 \geq 6,34$ кВт. Умова виконується. Це означає, що двигун здатний забезпечити необхідну механічну потужність на валу насоса з урахуванням запасу. Такий

запас необхідний, оскільки в реальних умовах експлуатації насосна установка може працювати при змінному напорі, коливаннях витрати, зміні гідравлічного опору трубопроводу та можливого зниженні ККД окремих елементів системи.

Асинхронний електродвигун, підключений безпосередньо до мережі 380 В, 50 Гц, працює практично з постійною частотою обертання. У нашому випадку номінальна частота обертання становить 2900 об/хв, що відповідає дво полюсному двигуну з синхронною частотою обертання 3000 об/хв. Різниця між синхронною та фактичною частотою обертання пояснюється ковзанням.

Фактична частота обертання ротора менша від синхронної через наявність ковзання. Номінальне ковзання становить:

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \quad (3.2)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв; n – номінальна частота обертання, об/хв.

Отже, номінальне ковзання становить: $s_n=0,033$. Це значення є характерним для асинхронних двигунів малої та середньої потужності і свідчить про нормальний режим роботи електродвигуна при номінальному навантаженні.

З урахуванням розрахованого коефіцієнта завантаження $K_3=0,85$, вибраний двигун можна вважати придатним для роботи у складі насосної установки. Він має достатній резерв потужності, але не є надмірно завищеним за номіналом, що важливо з точки зору енергоефективності.

3.3 Розрахунок електричних і механічних параметрів електродвигуна

Для подальшої побудови механічної характеристики асинхронного електродвигуна та аналізу режимів роботи необхідно визначити його основні електричні й механічні параметри: номінальний струм, пусковий струм, кутову швидкість, номінальний момент, пусковий момент і максимальний момент.

Номінальний струм трифазного асинхронного двигуна визначається за формулою:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U\eta\cos\varphi} \quad (3.3)$$

Підставляємо вихідні дані: $I_n=14,8$ А.

Пусковий струм двигуна визначається за формулою:

$$I_p = K_i I_n \quad (3.4)$$

де K_i – кратність пускового струму. Пусковий струм: $I_p=111$ А.

Отже, при прямому пуску двигун короткочасно споживає струм близько 111 А, що значно перевищує номінальне значення. Це підтверджує доцільність застосування частотного перетворювача, оскільки він дозволяє обмежити пусковий струм і забезпечити плавний розгін насосного агрегату.

Номінальна кутова швидкість двигуна визначається за формулою 2.5, а номінальний момент за формулою 2.6. Таким чином, $\omega_n=(3,14 \cdot 2900)/30=303,4$ рад/с, а $M_n=24,7$ Н·м.

Для побудови механічної характеристики приймаємо типові для асинхронного двигуна співвідношення:

$$\frac{M_{max}}{M_n} = 2.8 \quad (3.5)$$

$$\frac{M_p}{M_n} = 2.0 \quad (3.6)$$

де M_{max} – максимальний, або критичний, момент; M_p – пусковий момент.

Тоді максимальний момент: $M_{max}=2,8M_n=69,2$ Н·м, а пусковий момент: $M_p=2,0M_n=2,0 \cdot 24,7=49,4$ Н·м.

Отримані електричні та механічні параметри зведено в таблицю 3.3.

Отримані значення показують, що двигун має достатній пусковий і максимальний моменти для приводу відцентрового насоса. Водночас значна величина пускового струму при прямому пуску підтверджує необхідність

використання частотного регулювання для зменшення електричних і механічних навантажень.

Таблиця 3.3 — Розрахункові електричні та механічні параметри двигуна

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність	P_n	7,5 кВт
Номінальна напруга	U_n	380 В
ККД	η	0,875
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,88
Номінальний струм	I_n	14,8 А
Пусковий струм	I_p	111 А
Синхронна частота обертання	n_0	3000 об/хв
Номінальна частота обертання	n	2900 об/хв
Номінальне ковзання	s_n	0,033
Кутова швидкість	ω_n	303,4 рад/с
Номінальний момент	M_n	24,7 Н·м
Пусковий момент	M_p	49,4 Н·м
Максимальний момент	M_{\max}	69,2 Н·м

Енергоефективність електродвигунів змінного струму оцінюється відповідно до класифікації ІЕ, визначеної стандартом ІЕС 60034-30-1 [3]. Цей стандарт установлює класи ефективності для одношвидкісних електродвигунів, що працюють від синусоїдальної напруги живлення. Тому при практичному виборі двигуна доцільно орієнтуватися не лише на потужність і швидкість обертання, а й на клас енергоефективності.

3.4 Побудова природної механічної характеристики асинхронного двигуна

Механічна характеристика асинхронного електродвигуна показує залежність електромагнітного моменту двигуна від частоти обертання ротора або від ковзання. Для насосного електропривода така характеристика має важливе значення, оскільки дозволяє оцінити умови пуску, запас за моментом, стійкість роботи та відповідність двигуна навантаженню.

Природна механічна характеристика відповідає роботі двигуна при номінальній напрузі та частоті живлення, тобто при: $U=380$ В, $f=50$ Гц.

Швидкість обертання ротора при заданому ковзанні визначається за формулою:

$$n=n_0(1-s), \quad (3.7)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв; s – ковзання.

Для побудови механічної характеристики використовують залежність моменту від ковзання. У навчальних і прикладних розрахунках часто застосовують наближену формулу Клосса, яка дозволяє визначити момент асинхронного двигуна за відомими значеннями критичного моменту та ковзання. Механічна характеристика має характерну форму: при пуску двигун розвиває пусковий момент, далі момент зростає до максимального значення, після чого на робочій ділянці зменшується до номінального значення.

Для побудови приймаємо такі вихідні значення:

$$M_n=24,7 \text{ Н}\cdot\text{м}, M_p=49,4 \text{ Н}\cdot\text{м}, M_{\max}=69,2 \text{ Н}\cdot\text{м}, n_0=3000 \text{ об/хв}.$$

Розрахункові значення природної механічної характеристики наведено в таблиці 3.4.

Аналіз природної механічної характеристики показує, що двигун має достатній запас за моментом. Максимальний момент становить 69,2 Н·м, що у 2,8 раза перевищує номінальний момент. Це забезпечує стійкість роботи двигуна при короткочасному збільшенні навантаження, наприклад, у разі підвищення гідравлічного опору трубопроводу або зміни режиму подачі води.

За даними таблиці 3.4 будемо графік природної механічної характеристики двигуна $M=f(n)$.

Пусковий момент становить 49,4 Н·м, що перевищує номінальний момент удвічі. Для відцентрового насоса це є достатнім, оскільки момент опору насоса на початку розгону є відносно невеликим. Проте при прямому пуску виникає значний пусковий струм, тому для поліпшення режиму запуску доцільно застосувати частотний перетворювач.

Таблиця 3.4 – Дані для побудови природної механічної характеристики двигуна

Ковзання s	Частота обертання n, об/хв	Момент двигуна M, Н·м
1,00	0	49,4
0,70	900	58,1
0,50	1500	64,7
0,30	2100	69,2
0,20	2400	67,0
0,10	2700	53,8
0,033	2900	24,7
0	3000	0

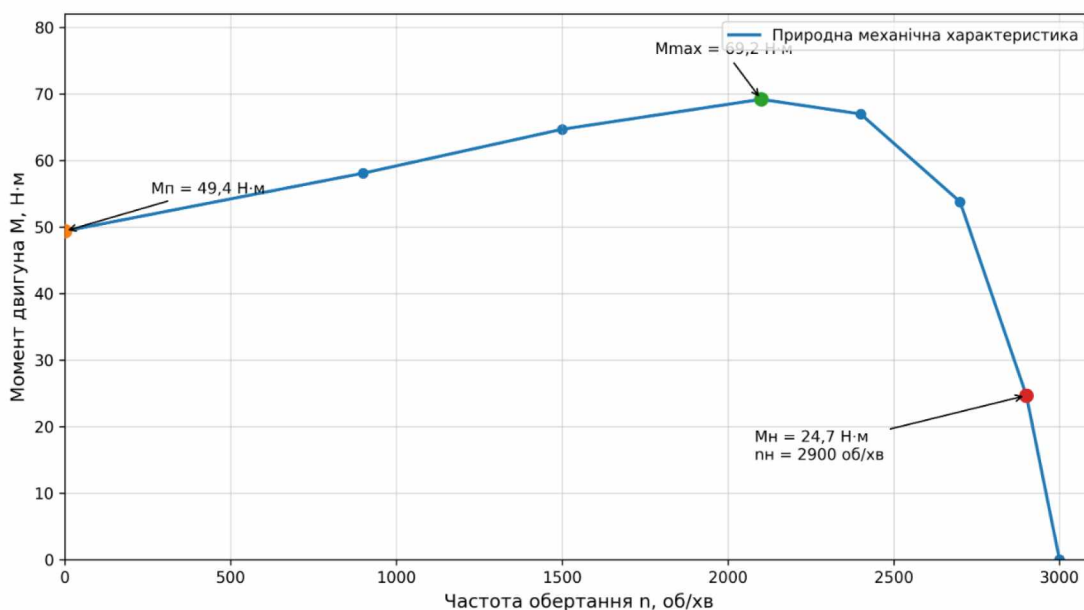


Рисунок 3.1 – Природна механічна характеристика асинхронного електродвигуна

3.5 Побудова характеристики навантаження насосного агрегату

Для правильного аналізу роботи електропривода необхідно порівняти механічну характеристику двигуна з характеристикою навантаження насосного агрегату. Відцентровий насос належить до механізмів із вентиляторною характеристикою навантаження. Це означає, що момент опору насоса зростає приблизно пропорційно квадрату швидкості обертання.

Момент опору насосного агрегату можна описати залежністю:

$$M_c = M_0 + (M_n - M_0) \left(\frac{n}{n_n}\right)^2 \quad (3.8)$$

де M_c – момент статичного опору насоса, Н·м; M_0 – початковий момент опору, Н·м; M_n – номінальний момент двигуна, Н·м; n – поточна частота обертання, об/хв;

n_n – номінальна частота обертання, об/хв.

Для розрахунку приймаємо:

$$M_0 = 0,1 M_n. \quad (3.9)$$

$$M_0 = 0,1 \cdot 24,7 = 2,47 \text{ Н·м.}$$

Розрахунок моменту опору насоса для різних швидкостей наведено в таблиці 3.5.

За даними таблиці 3.5 побудували характеристику навантаження насоса $M_c = f(n)$. Для більш повного аналізу доцільно нанести її на один графік разом із природною механічною характеристикою двигуна.

Аналіз навантажувальної характеристики показує, що на малих швидкостях момент опору насоса є незначним. Це пояснюється тим, що

відцентровий насос не потребує великого пускового моменту, на відміну від механізмів із постійним моментом навантаження.

Таблиця 3.5 – Дані для побудови характеристики навантаження насосного агрегату

Частота обертання n , об/хв	Момент опору насоса M_c , Н·м
0	2,47
300	2,71
600	3,42
900	4,61
1200	6,28
1500	8,42
1800	11,03
2100	14,13
2400	17,70
2700	21,74
2900	24,70

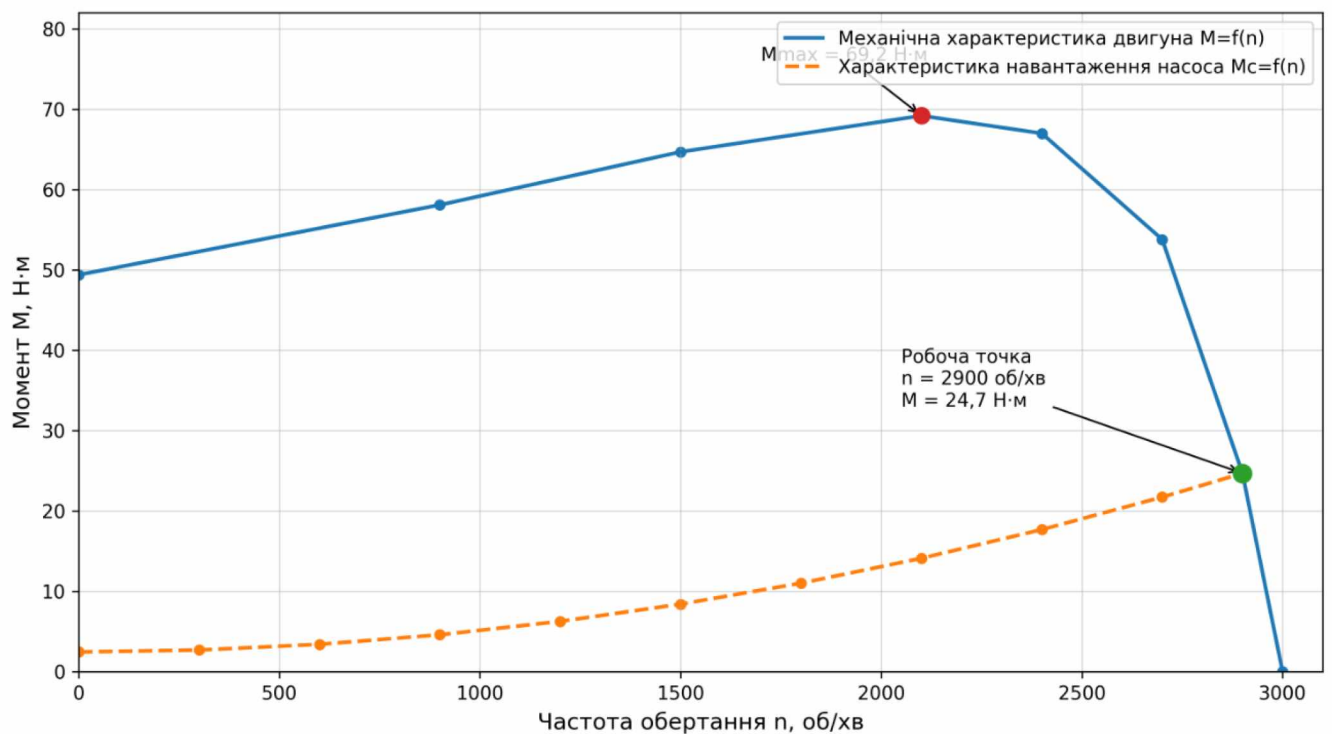


Рисунок 3.2 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна та характеристика навантаження насосного агрегату

Саме тому частотне регулювання добре підходить для насосних установок: при зниженні швидкості зменшується не лише подача, а й момент опору та споживана потужність.

На номінальній швидкості 2900 об/хв момент опору насоса досягає приблизно 24,7 Н·м, що відповідає номінальному моменту двигуна. Це підтверджує узгодженість параметрів електродвигуна та насосного агрегату.

3.6 Аналіз режимів роботи електропривода при зміні продуктивності насоса

Однією з головних переваг частотно-регульованого електропривода є можливість зміни швидкості обертання насоса відповідно до фактичної потреби у воді. Для відцентрових насосів зміна швидкості призводить до зміни подачі, напору та потужності за законами подібності.

У посібнику *Variable Speed Pumping: A Guide to Successful Applications*, зазначено, що насоси зі змінною швидкістю доцільні для систем зі змінною потребою у витраті, оскільки дозволяють узгоджувати роботу насоса з характеристиками системи та знижувати енергоспоживання [5, 14, 15].

Виконаємо розрахунок відносних параметрів насосного агрегату при зміні швидкості обертання від 100 до 70 % від номінального значення.

З таблиці 3.6 видно, що при зниженні швидкості обертання насоса до 90 % від номінальної потужність становить приблизно 72,9 % від номінальної. При зниженні швидкості до 80 % потужність зменшується до 51,2 %, а при 70 % до 34,3 %. Це підтверджує високу ефективність регулювання швидкості саме для відцентрових насосів.

У технічних матеріалах АВВ щодо застосування регульованих електроприводів у насосних системах також підкреслюється, що використання приводів зі змінною швидкістю в насосних установках дозволяє зменшити

споживання енергії порівняно з традиційними способами регулювання подачі, такими як дроселювання або байпасне регулювання [17].

Таблиця 3.6 – Відносні параметри насосного агрегату при зміні швидкості обертання

Відносна швидкість, n^*	Відносна подача, Q^*	Відносний напір, H^*	Відносна потужність, P^*
1,0	1,0	1,000	1,000
0,9	0,9	0,810	0,729
0,8	0,8	0,640	0,512
0,7	0,7	0,490	0,343

На рис. 3.3 представлено графік залежності відносної потужності від відносної швидкості обертання.

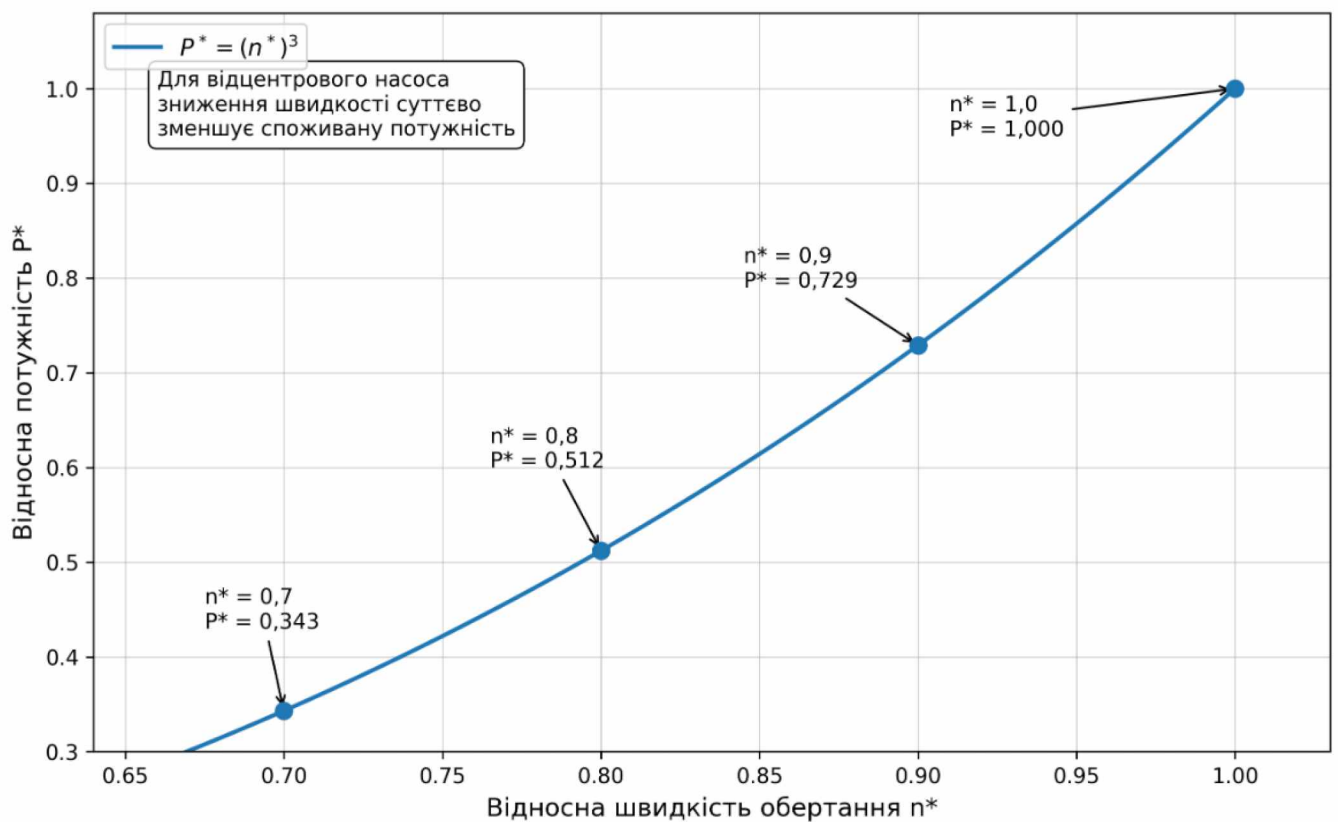


Рисунок 3.3 – Залежність відносної потужності насосного агрегату від швидкості обертання

Для заданого двигуна потужністю 7,5 кВт оцінимо споживану потужність при різних відносних швидкостях. Результати наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Орієнтовна потужність електропривода при зміні швидкості обертання

Відносна швидкість, n^*	Потужність P , кВт	Зменшення потужності порівняно з номіналом, %
1,0	7,50	0
0,9	5,47	27,1
0,8	3,84	48,8
0,7	2,57	65,7

Розрахунки показують, що навіть незначне зниження частоти обертання насоса дозволяє суттєво зменшити споживану потужність. Наприклад, при роботі на 80 % від номінальної швидкості потужність становить приблизно 3,84 кВт замість 7,5 кВт. Це пояснює, чому очікуване скорочення електроспоживання на рівні 35 % є технічно обґрунтованим.

Разом із тим у реальних умовах фактична економія залежить від багатьох факторів: тривалості роботи в режимах часткового навантаження, гідравлічної характеристики трубопроводу, статичного напору, ККД насоса, ККД двигуна та втрат у частотному перетворювачі. Тому в подальшому розділі доцільно перейти до вибору частотного перетворювача, розробки системи керування та оцінки енергетичного ефекту від модернізації.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано розрахунок та аналіз основних параметрів електропривода насосної установки. На основі вихідних даних уточнено параметри насосного агрегату: продуктивність становить $80 \text{ м}^3/\text{год}$, розрахунковий напір — $20,4 \text{ м}$, гідравлічна потужність — $4,44 \text{ кВт}$, а орієнтовна потужність на валу насоса — $6,34 \text{ кВт}$.

Проведено перевірку вибраного асинхронного електродвигуна потужністю $7,5 \text{ кВт}$. Встановлено, що двигун відповідає умовам роботи насосної установки за потужністю, частотою обертання та коефіцієнтом завантаження. Коефіцієнт завантаження становить $0,85$, що свідчить про достатнє використання встановленої потужності та наявність необхідного резерву.

Розраховано основні електричні та механічні параметри двигуна. Номінальний струм становить $14,8 \text{ А}$, пусковий струм при прямому пуску — приблизно 111 А , номінальна кутова швидкість — $303,4 \text{ рад/с}$, номінальний момент — $24,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Максимальний момент двигуна становить $69,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а пусковий момент — $49,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Побудова природної механічної характеристики асинхронного двигуна показала, що двигун має достатній запас за моментом і здатний забезпечити стійку роботу насосного агрегату. Характеристика навантаження насоса підтвердила, що момент опору зростає приблизно пропорційно квадрату швидкості обертання, що є типовим для відцентрових насосів.

Проаналізовано режими роботи електропривода при зміні швидкості обертання насоса. Встановлено, що при зменшенні швидкості до 80% від номінальної споживана потужність теоретично знижується до $51,2 \%$, а при 70% — до $34,3 \%$. Це підтверджує доцільність застосування частотного регулювання для підвищення енергоефективності насосної установки.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

4.1 Вибір частотного перетворювача для електропривода насосної установки

Для модернізації електропривода насосної установки приймається система частотного керування, яка забезпечує плавну зміну швидкості обертання асинхронного електродвигуна відповідно до фактичної потреби у воді. У попередніх розділах було встановлено, що для приводу насоса використовується асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором потужністю 7,5 кВт, напругою живлення 380 В, частотою обертання 2900 об/хв, ККД 87,5 % та коефіцієнтом потужності $\cos\varphi=0,88$.

Номинальний струм двигуна становить: $I_n=14,8\text{А}$.

Пусковий струм при прямому пуску може досягати: $I_p=111\text{А}$.

Значна величина пускового струму підтверджує доцільність застосування частотного перетворювача, який дає змогу обмежити пусковий струм, забезпечити плавний розгін двигуна і зменшити механічні навантаження на насосний агрегат.

Вибір частотного перетворювача виконується за такими основними умовами:

$$\begin{aligned} P_{\text{ПЧ}} &\geq P_n, \\ U_{\text{ПЧ}} &= U_n, \\ I_{\text{ПЧ}} &\geq I_n. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Для забезпечення надійності роботи приймаємо запас за струмом:

$$I_{\text{ПЧ}}=1,1I_n \text{ Тобто } I_{\text{ПЧ}}=16,3\text{ А}.$$

Отже, для електродвигуна потужністю 7,5 кВт необхідно вибрати частотний перетворювач із номінальним вихідним струмом не менше 16,3 А.

Для подальшої розробки приймаємо частотний перетворювач класу 7,5 кВт, 380–400 В, з номінальним вихідним струмом близько 17 А. Як приклад

такого обладнання може бути використано перетворювач АВВ ACS580-01-018А-4, який відповідає заданій потужності та напрузі живлення [17].

В табл. 4.1 здійснена перевірка відповідності частотного перетворювача параметрам електродвигуна

Таблиця 4.1 – Перевірка відповідності частотного перетворювача параметрам електродвигуна

Параметр	Розрахункове значення	Прийняте значення	Умова вибору	Висновок
Потужність двигуна	7,5 кВт	7,5 кВт	$P_{ПЧ} \geq P_n$	виконується
Напруга живлення	380 В	380–400 В	$U_{ПЧ} = U_n$	виконується
Номинальний струм двигуна	14,8 А	17 А	$I_{ПЧ} \geq I_n$	виконується
Струм із запасом	16,3 А	17 А	$I_{ПЧ} \geq 1,1I_n$	виконується
Тип навантаження	насосне	насосний режим	відповідність режиму	виконується

Вибраний частотний перетворювач відповідає параметрам електродвигуна насосної установки. Його застосування дозволяє реалізувати плавний пуск, регулювання швидкості, автоматичне підтримання тиску та захист електродвигуна від аварійних режимів.

4.2 Розробка системи керування електроприводом насосної установки

Модернізована система керування повинна забезпечувати роботу насосної установки в автоматичному та ручному режимах. Основним регульованим

параметром приймається тиск у напірному трубопроводі. Для його контролю використовується датчик тиску, сигнал з якого надходить на аналоговий вхід частотного перетворювача.

На рис. 4.1 подана функціональна структура системи керування насосною установкою з частотним перетворювачем.



Рисунок 4.1 – Функціональна схема системи частотного керування насосною установкою

У такій системі частотний перетворювач виконує функції живлення двигуна, регулювання частоти обертання, плавного пуску, плавної зупинки, захисту та автоматичного підтримання заданого тиску.

Принцип роботи системи полягає в тому, що оператор задає необхідне значення тиску. Датчик тиску вимірює фактичний тиск у трубопроводі та передає сигнал на частотний перетворювач. Якщо тиск зменшується нижче заданого значення, перетворювач підвищує частоту живлення двигуна, внаслідок чого збільшується швидкість обертання насоса і його подача. Якщо тиск перевищує задане значення, частота живлення зменшується, що призводить до зниження продуктивності насоса та економії електроенергії.

Для системи передбачаються два режими керування: ручний режим – оператор задає частоту обертання двигуна з панелі керування частотного перетворювача; автоматичний режим – частотний перетворювач самостійно змінює швидкість двигуна за сигналом датчика тиску.

До складу системи керування входять: автоматичний вимикач; частотний перетворювач; асинхронний електродвигун; відцентровий насос; датчик тиску; кнопки «Пуск» і «Стоп»; кнопка аварійного вимкнення; світлова сигналізація режимів роботи; захисна апаратура.

Коло керування забезпечує подачу команд на відповідні входи частотного перетворювача. Датчик тиску підключається до аналогового входу. Найбільш доцільним є використання промислового сигналу 4–20 мА, оскільки він має добру заводостійкість і дозволяє контролювати справність лінії зв'язку. Силова частина схеми має вигляд:

$$L1, L2, L3 \rightarrow QF \rightarrow ПЧ \rightarrow М$$

де QF – автоматичний вимикач; ПЧ – частотний перетворювач; М – асинхронний електродвигун насоса.

На рисунку 4.2 наведена принципова схема системи керування електроприводом насосної установки

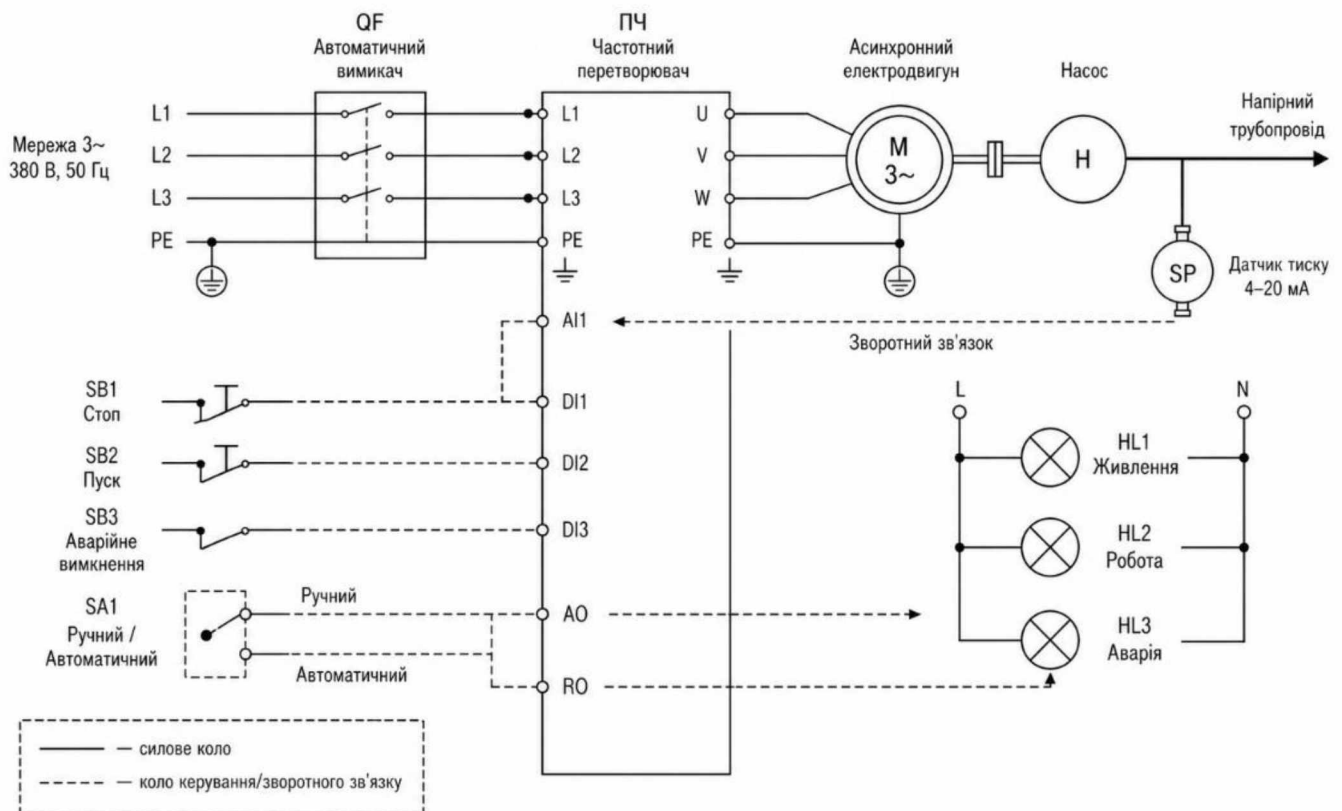


Рисунок 4.2 – Принципова електрична схема системи керування електроприводом насосної установки

4.3 Вибір апаратури керування, захисту та параметрів налаштування

Для безпечної експлуатації електропривода необхідно виконати вибір комутаційної та захисної апаратури. Основним захисним апаратом у силовому колі є автоматичний вимикач, який встановлюється перед частотним перетворювачем.

Номінальний струм електродвигуна становить: $I_n=14,8$. $I_{QF}=18,5$ А.

Найближче стандартне значення номінального струму автоматичного вимикача: $I_{QF}=20$ А.

Тобто для захисту силового кола доцільно прийняти триполюсний автоматичний вимикач на 20 А. Остаточний вибір типу автоматичного вимикача повинен виконуватися з урахуванням рекомендацій виробника частотного перетворювача, умов короткого замикання, способу прокладання кабелів та вимог електробезпеки. Попередній вибір апаратури наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вибір апаратури керування та захисту

Елемент системи	Позначення	Розрахунковий параметр	Прийняте рішення
Автоматичний вимикач	QF	$I_{QF}=18,5$	3P, 20 А
Частотний перетворювач	ПЧ	$P=7,5$ кВт, $I \geq 16,3$ А	7,5 кВт, 17 А
Електродвигун	М	$P_n=7,5$ кВт	380 В, 2900 об/хв
Датчик тиску	SP	сигнал 4–20 мА	за робочим діапазоном тиску
Кнопка пуску	SB2	дискретний вхід ПЧ	«Пуск»

Кнопка зупинки	SB1	дискретний вхід ПЧ	«Стоп»
Аварійна кнопка	SB3	коло аварійного вимкнення	«Аварія»
Світлова сигналізація	HL1–HL3	живлення/робота/аварія	сигнальні лампи

Для забезпечення правильної роботи частотного перетворювача необхідно ввести паспортні дані двигуна та параметри технологічного процесу. Основні параметри налаштування наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 — Основні параметри налаштування частотного перетворювача

Параметр	Значення	Призначення
Номінальна потужність двигуна	7,5 кВт	паспортні дані двигуна
Номінальна напруга	380 В	узгодження з мережею та двигуном
Номінальний струм	14,8 А	тепловий захист двигуна
Номінальна частота	50 Гц	базова частота
Номінальна швидкість	2900 об/хв	коректне регулювання
Мінімальна частота	30 Гц	обмеження нижньої швидкості
Максимальна частота	50 Гц	обмеження максимальної швидкості
Час розгону	7 с	плавний пуск
Час зупинки	10 с	зменшення гідродарів

Тип керування	$U/f = const$	стабільна робота насоса
Аналоговий вхід	4–20 мА	сигнал датчика тиску
Режим регулювання	ПІД-регулювання	підтримання заданого тиску

Мінімальну частоту прийнято на рівні 30 Гц. Надмірне зниження частоти може призвести до недостатнього напору, нестабільної роботи насоса та погіршення охолодження електродвигуна. Максимальна частота обмежується номінальним значенням 50 Гц, що відповідає паспортному режиму роботи двигуна.

Час розгону 7 с і час зупинки 10 с прийнято з урахуванням необхідності плавної зміни швидкості потоку води. Це дозволяє зменшити ймовірність виникнення гідроударів і знизити механічні навантаження на насос, трубопровідну арматуру та муфтове з'єднання.

4.4 Аналіз режимів роботи та очікуваного енергетичного ефекту

Для оцінки роботи електропривода при частотному регулюванні розглянемо зміну параметрів насосного агрегату при частотах 50, 45, 40, 35 і 30 Гц. Для двополусного асинхронного двигуна синхронна частота обертання визначається формулою (2.7).

Оскільки $p=1$, при зміні частоти живлення змінюється і швидкість обертання двигуна. Орієнтовна робоча швидкість визначається з урахуванням номінального ковзання: $n \approx n_0(1-s_n)$, де $s_n=0,033$.

Таблиця 4.4 – Режими роботи електропривода при частотному регулюванні

Частота f , Гц	Віднос на швидкість, n^*	Орієнтов на швидкість n , об/хв	Подача a , м ³ /год	Потужність P , кВт
50	1,00	2900	80,0	7,50
45	0,90	2610	72,0	5,47

40	0,80	2320	64,0	3,84
35	0,70	2030	56,0	2,57
30	0,60	1740	48,0	1,62

З таблиці 4.4 видно, що зменшення частоти живлення дає змогу знизити швидкість обертання насоса, а разом із цим – його подачу та споживану потужність. Наприклад, при частоті 40 Гц швидкість становить приблизно 80 % від номінальної, а споживана потужність – близько 3,84 кВт. Це відповідає 51,2 % від номінальної потужності.

На рис. 4.3 представлена зміна потужності насосного агрегату при частотному регулюванні.

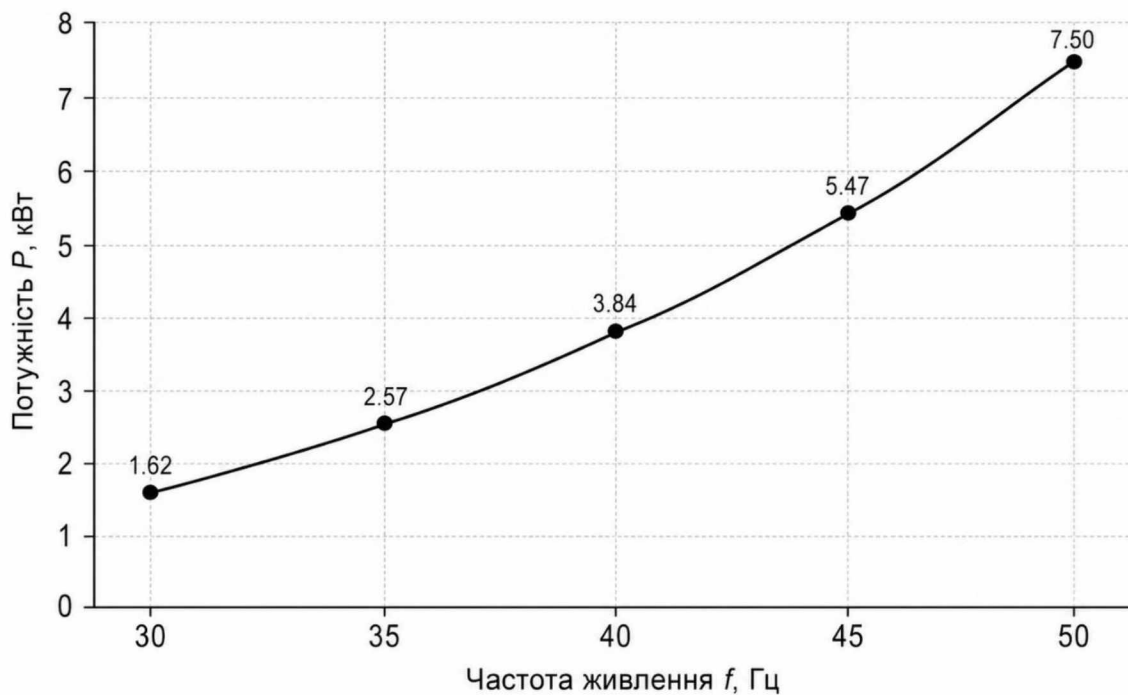


Рисунок 4.3 — Зміна потужності насосного агрегату при частотному регулюванні

Для оцінки енергетичного ефекту розглянемо умовний добовий графік роботи насосної установки (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Умовний добовий графік роботи насосної установки

Режим	Віднос на швидкість, η^*	Потужні сть P , кВт	Триваліс ть, год	Енерг ія, кВт·год
Максимал ьне водоспоживанн я	1,0	7,50	6	45,0
Середнє водоспоживанн я	0,9	5,47	8	43,8
Знижене водоспоживанн я	0,8	3,84	6	23,0
Мінімальн е водоспоживанн я	0,7	2,57	4	10,3
Разом	—	—	24	122,1

Якщо насос працює без частотного регулювання протягом доби з номінальною потужністю 7,5 кВт, споживання електроенергії становить:

$$W_1 = 7,5 \cdot 24 = 180 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

При частотному регулюванні за умовним добовим графіком:

$$W_2 = 122,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Добова економія електроенергії:

$$\Delta W = W_1 - W_2 \tag{4.2}$$

Отримуємо, що $\Delta W = 180 - 122,1 = 57,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Відносна економія:

$$E = \frac{\Delta W}{W_1} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Таким чином, $E=57,9180 \cdot 100=32,2\%$.

Отримане значення близьке до очікуваного скорочення електроспоживання на рівні 35 %, що передбачалося у вихідних даних. Це підтверджує доцільність модернізації електропривода насосної установки шляхом застосування частотного регулювання [5, 6, 14, 16].

На рис. 4.4. наведені результати порівняння добового електроспоживання насосної установки до та після модернізації.

Рисунок відображає порівняння добового електроспоживання насосної установки до та після впровадження частотного регулювання. У разі роботи без частотного перетворювача насосний агрегат функціонує з постійною частотою обертання, тому за добу споживає близько 180,0 кВт·год електроенергії. Такий режим є менш ефективним, оскільки двигун працює практично з номінальною швидкістю навіть у періоди зменшеного водоспоживання.

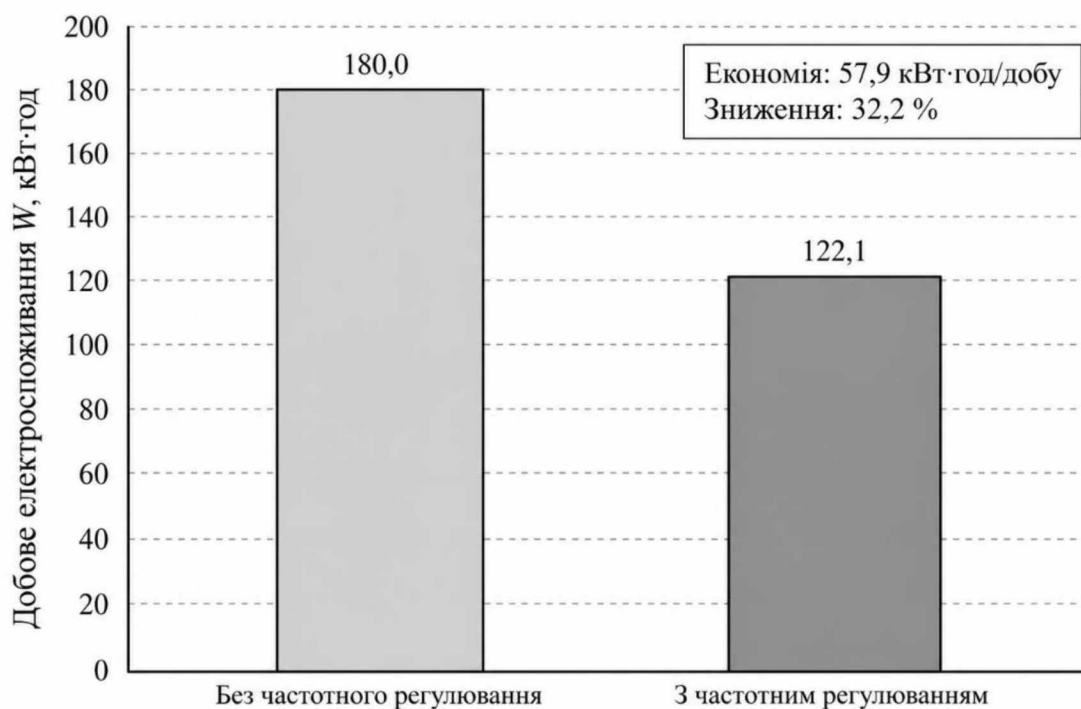


Рисунок 4.4 – Порівняння добового електроспоживання насосної установки до та після модернізації

Таким чином, застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє зменшити споживання електроенергії, стабілізувати тиск у системі, знизити пускові струми та підвищити надійність роботи насосної установки.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розроблено систему частотного керування електроприводом насосної установки. Для двигуна потужністю 7,5 кВт обґрунтовано вибір частотного перетворювача класу 7,5 кВт, 380–400 В, із номінальним вихідним струмом близько 17 А. Перевірка показала, що вибраний перетворювач відповідає параметрам електродвигуна за потужністю, напругою та струмом.

Розроблено структуру системи керування, яка включає мережу живлення 380 В, автоматичний вимикач, частотний перетворювач, асинхронний електродвигун, насос, трубопровід і датчик тиску. Така система реалізує замкнений принцип керування, за якого частота обертання двигуна змінюється відповідно до фактичного тиску в трубопроводі.

Виконано вибір основної апаратури керування та захисту. Для силового кола запропоновано триполюсний автоматичний вимикач на 20 А. Також передбачено використання кнопок «Пуск», «Стоп», аварійного вимкнення, датчика тиску та світлової сигналізації режимів роботи.

Визначено основні параметри налаштування частотного перетворювача: номінальна потужність двигуна 7,5 кВт, номінальний струм 14,8 А, мінімальна частота 30 Гц, максимальна частота 50 Гц, час розгону 7 с, час зупинки 10 с, аналоговий сигнал датчика тиску 4–20 мА.

Проведено аналіз режимів роботи насосного агрегату при частотному регулюванні. Встановлено, що при зменшенні частоти живлення з 50 до 40 Гц споживана потужність знижується з 7,5 до 3,84 кВт. За умовним добовим графіком роботи економія електроенергії становить 57,9 кВт·год на добу, або близько 32,2 %. Це підтверджує енергетичну доцільність впровадження частотно-регульованого електропривода насосної установки.

5 ОЦІНКА БЕЗПЕЧНОСТІ, ЕКОЛОГІЧНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

5.1 Загальна характеристика безпеки модернізованої насосної установки

Модернізована насосна установка є електромеханічною системою, до складу якої входять асинхронний електродвигун, частотний перетворювач, насос, трубопровідна мережа, датчик тиску, комутаційна і захисна апаратура. Під час її експлуатації необхідно враховувати електричні, механічні, теплові та гідравлічні небезпечні фактори.

Основними потенційно небезпечними факторами під час експлуатації насосної установки є:

- ураження електричним струмом при дотику до струмовідних частин;
- виникнення короткого замикання або перевантаження електродвигуна;
- перегрівання електрообладнання внаслідок тривалої роботи або несправності системи охолодження;
- механічне травмування обертовими частинами електродвигуна, муфти або насоса;
- виникнення гідрударів у трубопровідній мережі;
- підвищений рівень шуму та вібрації;
- аварійна зупинка насоса внаслідок відмови частотного перетворювача або датчика тиску.

Питання безпечної експлуатації електроустановок в Україні регламентуються, зокрема, Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів [20]. Цей нормативний документ установлює вимоги до організації безпечного виконання робіт в електроустановках споживачів. На порталі Верховної Ради України документ наведений як чинний нормативний акт.

Крім того, під час проектування і експлуатації електрообладнання необхідно враховувати вимоги Правил улаштування електроустановок [21]. Ці правила спрямовані на підвищення надійності та безпеки електроустановок і є

базовим нормативним документом для вибору схем живлення, захисту, заземлення та апаратури.

Для електрообладнання машин важливими є вимоги ДСТУ EN 60204-1:2019, який визначає загальні вимоги до електричного устаткування машин [22]. Згідно з інформацією каталогу стандартів, цей стандарт є чинним з 01.01.2020 і є ідентичним до EN 60204-1:2018 з урахуванням ІЕС 60204-1:2016.

З урахуванням зазначених вимог модернізована система електропривода повинна мати: надійне захисне заземлення; автоматичний вимикач у силовому колі; захист від короткого замикання; захист від перевантаження двигуна; захист від обриву або перекосу фаз; аварійне вимкнення; світлову індикацію режимів роботи; захист персоналу від випадкового дотику до струмовідних частин; огороження рухомих частин насоса та муфтового з'єднання.

Безпечність модернізованого електропривода повинна забезпечуватися не лише правильним вибором апаратури, а й дотриманням вимог нормативних документів, організацією технічного обслуговування та підготовкою персоналу.

5.2 Заходи з охорони праці та електробезпеки під час експлуатації електропривода

Експлуатація насосної установки з частотно-регульованим електроприводом повинна здійснюватися персоналом, який має відповідну кваліфікацію, пройшов інструктаж з охорони праці та допущений до роботи з електроустановками. Перед початком роботи необхідно перевірити справність електрообладнання, стан заземлення, відсутність пошкоджень кабелів, клемних з'єднань, корпусу частотного перетворювача, електродвигуна та апаратури керування.

До основних організаційних заходів з охорони праці належать: допуск до роботи лише навченого персоналу; проведення первинного, повторного та цільового інструктажів; використання засобів індивідуального захисту; ведення журналів технічного обслуговування; виконання робіт за нарядом або розпорядженням у випадках, передбачених нормативними документами; заборона роботи при відкритих шафах керування і знятих захисних кожухах;

перевірка відсутності напруги перед ремонтними роботами; вивішування попереджувальних плакатів.

До технічних заходів електробезпеки належать: встановлення автоматичного вимикача у силовому колі; застосування захисного заземлення корпусів електродвигуна, насоса, частотного перетворювача та шафи керування; використання кабелів відповідного перерізу та ізоляції; захист від короткого замикання та перевантаження; застосування аварійної кнопки вимкнення; контроль температури електродвигуна і частотного перетворювача; недопущення потрапляння вологи у шафу керування; забезпечення вентиляції частотного перетворювача.

Оскільки насосна установка працює з водою, особливу увагу необхідно приділяти захисту від ураження електричним струмом у вологому середовищі. Усі металеві неструмовідні частини, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, повинні бути приєднані до захисного провідника РЕ. Надійність заземлення слід періодично перевіряти.

Під час технічного обслуговування частотного перетворювача необхідно враховувати, що після відключення живлення на його внутрішніх конденсаторах може певний час зберігатися небезпечна напруга. Тому ремонтні роботи дозволяється виконувати лише після повного знеструмлення обладнання, витримки часу, рекомендованого виробником, і перевірки відсутності напруги на відповідних клеммах.

Для зменшення механічних ризиків необхідно передбачити огороження муфтового з'єднання між електродвигуном і насосом. Забороняється торкатися обертових частин під час роботи установки, виконувати ремонт або очищення обладнання без його повної зупинки та знеструмлення.

Важливою перевагою модернізованого електропривода є плавний пуск і плавна зупинка двигуна. Це знижує ймовірність виникнення гідроударів у трубопровідній мережі, зменшує динамічні навантаження на насос, арматуру та трубопроводи, а також підвищує загальну безпечність експлуатації.

5.3 Екологічна оцінка запропонованого технічного рішення

Модернізація електропривода насосної установки має позитивний екологічний ефект, оскільки спрямована на зменшення споживання електричної енергії. Зниження електроспоживання дозволяє зменшити непрямий вплив на довкілля, пов'язаний із виробництвом електроенергії, а також підвищити ресурс роботи обладнання.

Екологічна ефективність технічного рішення проявляється у таких напрямках:

- зменшення витрат електроенергії;
- скорочення непрямих викидів, пов'язаних із виробництвом електроенергії;
- зменшення втрат води за рахунок стабілізації тиску;
- зниження рівня гідравлічних ударів і аварійності трубопроводів;
- зменшення зношування електродвигуна, насоса та арматури;
- продовження строку служби обладнання;
- зниження потреби у ремонті та заміні вузлів.

Вимоги до систем екологічного управління визначає ДСТУ ISO 14001:2015 [23]. Цей стандарт установлює вимоги до системи екологічного управління, які організація може використовувати для підвищення своєї екологічної дієвості. При розгляді насосної установки це означає, що впровадження енергоефективного обладнання є одним зі шляхів зменшення негативного впливу виробничих процесів на довкілля.

Екологічний ефект від модернізації можна оцінити через річну економію електроенергії. У розділі 4 встановлено, що добова економія становить:

$$\Delta W_{\text{д}}=57,9 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}.$$

Якщо насосна установка працює 250 діб на рік, річна економія електроенергії становитиме:

$$\Delta W_{\text{р}}=57,9\cdot 250=14475 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}.$$

Якщо установка працює безперервно протягом року, тобто 365 діб, тоді:

$$\Delta W_{\text{р}}=57,9\cdot 365=21133,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$$

Отже, навіть за помірною режиму експлуатації модернізація дозволяє заощадити близько 14,5 тис. кВт·год на рік, а при щоденній роботі – понад 21,1 тис. кВт·год на рік.

Крім зменшення електроспоживання, частотне регулювання позитивно впливає на гідравлічну систему. Підтримання стабільного тиску знижує ймовірність пошкодження трубопроводів, запірної арматури та з'єднань. Це зменшує ризик витоків води, аварійних ситуацій і додаткових витрат на ремонт.

Таким чином, запропоноване технічне рішення можна вважати екологічно доцільним, оскільки воно сприяє раціональному використанню електроенергії, зменшенню експлуатаційних втрат і підвищенню надійності роботи насосної установки.

5.4 Розрахунок економічної ефективності

Економічна ефективність модернізації електропривода насосної установки визначається насамперед зменшенням витрат на електроенергію. У попередньому розділі було встановлено, що без частотного регулювання добове електроспоживання становить: $W_1=180,0$ кВт·год. Після впровадження частотного регулювання добове електроспоживання зменшується до: $W_2=122,1$ кВт·год.

Добова економія: $\Delta W=W_1-W_2$, тобто $\Delta W=180,0-122,1=57,9$ кВт·год/добу

Відносне скорочення електроспоживання: $E=32,2\%$.

Отриманий результат близький до очікуваного скорочення електроспоживання на рівні 35 %, зазначеного у вихідних даних. Різниця пояснюється умовністю прийнятого добового графіка роботи насосної установки.

Річна економія електроенергії за умови роботи 250 діб на рік становить: $\Delta W_p=14475$ кВт·год/рік.

Для визначення грошової економії необхідно врахувати тариф на електроенергію. Оскільки тариф для конкретного підприємства може змінюватися залежно від умов договору, класу напруги, постачальника та

періоду розрахунку, у роботі приймаємо умовний розрахунковий тариф:
 $C_e=8,0$ грн/кВт·год.

Оскільки річна економія коштів становитиме: $E_{\text{грн}}=\Delta W_p \cdot C_e$,

Тоді $E_{\text{грн}}=14475 \cdot 8,0=115800$ грн/рік.

Для оцінки строку окупності необхідно врахувати капітальні витрати на модернізацію. До них належать вартість частотного перетворювача, датчика тиску, автоматичного вимикача, кабельної продукції, монтажу, налаштування та пусконаладжувальних робіт.

Орієнтовні витрати на модернізацію наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Орієнтовні витрати на модернізацію електропривода насосної установки

Стаття витрат	Орієнтовна вартість, грн
Частотний перетворювач 7,5 кВт	35000
Датчик тиску 4–20 мА	5000
Автоматичний вимикач, кнопки, сигнальна апаратура	6000
Кабельна продукція та монтажні матеріали	6000
Монтаж і пусконаладжувальні роботи	12000
Разом	64000

Строк окупності визначається за формулою:

$$T = \frac{K}{E_{\text{грн}}}$$

де K – капітальні витрати, грн; $E_{\text{грн}}$ – річна економія коштів, грн/рік.

Таким чином $T=0,55$ року. Отже, орієнтовний строк окупності модернізації становить приблизно: $T \approx 6,6$ місяця.

Результати економічного розрахунку наведено в таблиці 5.2.

Проведений розрахунок показує, що модернізація електропривода насосної установки є економічно доцільною. Навіть за умовного тарифу та помірною річного режиму роботи строк окупності становить менше одного року. У разі більш тривалої роботи установки або вищого тарифу на електроенергію строк окупності буде ще меншим.

Таблиця 5.2 — Показники економічної ефективності модернізації

Показник	Значення
Добове споживання без частотного регулювання	180,0 кВт·год
Добове споживання з частотним регулюванням	122,1 кВт·год
Добова економія електроенергії	57,9 кВт·год
Відносне скорочення електроспоживання	32,2 %
Річна економія електроенергії при 250 добах роботи	14475 кВт·год
Розрахунковий тариф	8,0 грн/кВт·год
Річна економія коштів	115800 грн
Орієнтовні капітальні витрати	64000 грн
Строк окупності	0,55 року

Запропонована модернізація електропривода насосної установки передбачає впровадження частотного перетворювача, датчика тиску та системи автоматичного підтримання заданого тиску в трубопровідній мережі. Такий підхід забезпечує комплексний технічний, енергетичний, економічний та екологічний ефект.

Основними технічними перевагами модернізованої системи є: плавний пуск і зупинка електродвигуна; зниження пускового струму; зменшення механічних навантажень; стабілізація тиску в трубопровідній мережі;

автоматичне регулювання продуктивності насоса; захист електродвигуна від аварійних режимів; підвищення ресурсу обладнання.

Енергетичний ефект полягає у зниженні добового електроспоживання з 180,0 до 122,1 кВт·год. Це забезпечує економію 57,9 кВт·год на добу, або 32,2 %. Такий результат підтверджує правильність вибору частотно-регульованого електропривода для насосної установки [13, 14, 16].

Економічний ефект полягає у скороченні витрат на електроенергію. За прийнятих умов розрахунку річна економія коштів становить близько 115800 грн, а строк окупності модернізації – приблизно 0,55 року.

Екологічний ефект полягає у зменшенні споживання електроенергії, зниженні непрямого впливу на довкілля, зменшенні зношування обладнання та підвищенні надійності роботи системи водопостачання.

Модернізація електропривода насосної установки з використанням частотного регулювання є технічно обґрунтованою, економічно доцільною та екологічно виправданою.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі виконано оцінку безпечності, екологічності та економічної ефективності модернізованого електропривода насосної установки. Розглянуто основні небезпечні фактори, які можуть виникати під час експлуатації електропривода, зокрема ураження електричним струмом, короткі замикання, перевантаження, перегрівання електрообладнання, механічні травми та гідравлічні удари.

Визначено основні заходи з охорони праці та електробезпеки. До них належать захисне заземлення, встановлення автоматичного вимикача, використання аварійного вимкнення, захист від перевантаження та короткого замикання, огороження обертових частин, перевірка відсутності напруги перед ремонтними роботами та допуск до обслуговування лише підготовленого персоналу.

Показано, що застосування частотно-регульованого електропривода позитивно впливає на безпечність експлуатації насосної установки, оскільки забезпечує плавний пуск і зупинку, знижує пускові струми, зменшує гідроудари та механічні навантаження на обладнання.

Виконано екологічну оцінку запропонованого технічного рішення. Встановлено, що модернізація сприяє зниженню електроспоживання, раціональному використанню енергоресурсів, зменшенню зношування обладнання та підвищенню надійності системи водопостачання.

Проведено економічний розрахунок ефективності модернізації. Добова економія електроенергії становить 57,9 кВт·год, або 32,2 %. За умови роботи 250 діб на рік річна економія електроенергії становить 14475 кВт·год. За прийнятого розрахункового тарифу 8,0 грн/кВт·год річна економія коштів дорівнює 115800 грн. Орієнтовний строк окупності модернізації становить 0,55 року.

Отже, впровадження частотно-регульованого електропривода насосної установки є доцільним, оскільки забезпечує підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат, покращення умов безпечної роботи та зменшення впливу на довкілля.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У бакалаврській роботі розроблено енергоефективний електропривод для насосної установки, призначеної для транспортування води з приймальної ємності до споживача. Обґрунтовано доцільність застосування частотного регулювання як найбільш ефективного способу керування продуктивністю відцентрового насоса.

2. Встановлено, що традиційні способи регулювання подачі води, зокрема дроселювання, байпасне регулювання та періодичне вмикання/вимикання насоса, супроводжуються додатковими енергетичними втратами, підвищенням зношуванням обладнання та погіршенням стабільності роботи системи водопостачання.

3. Виконано розрахунок основних параметрів насосної установки. За продуктивності 80 м³/год і розрахункового тиску 0,2 МПа напір становить приблизно 20,4 м водяного стовпа, гідравлічна потужність – 4,44 кВт, а орієнтовна потужність на валу насоса – 6,34 кВт. Це підтвердило правильність вибору асинхронного електродвигуна потужністю 7,5 кВт.

4. Розраховано електричні та механічні параметри електродвигуна: номінальний струм становить 14,8 А, пусковий струм при прямому пуску – близько 111 А, номінальний момент – 2 4,7 Н·м. Значна величина пускового струму підтверджує необхідність застосування частотного перетворювача для плавного пуску та зменшення навантаження на електричну мережу.

5. Побудовано та проаналізовано механічні характеристики електродвигуна і характеристику навантаження насосного агрегату. Встановлено, що електродвигун має достатній запас за моментом, а насосне навантаження має вентиляторний характер, за якого зменшення швидкості обертання суттєво знижує споживану потужність.

6. Запропоновано систему частотного керування насосною установкою, що включає частотний перетворювач класу 7,5 кВт, автоматичний вимикач, асинхронний електродвигун, насос, датчик тиску, кнопки керування та сигнальні елементи. Система забезпечує автоматичне підтримання заданого

тиску, плавний пуск і зупинку, захист електродвигуна та адаптацію продуктивності насоса до фактичного водоспоживання.

7. Оцінка ефективності модернізації показала, що застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє зменшити добове електроспоживання з 180,0 до 122,1 кВт·год. Добова економія становить 57,9 кВт·год, або 32,2 %. За умови роботи 250 діб на рік річна економія електроенергії становить 14475 кВт·год, а орієнтовний строк окупності модернізації – близько 0,55 року. Це підтверджує технічну, економічну та екологічну доцільність запропонованого рішення.