

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 вдосконаленої системи частотно-регульованого
електропривода насосної установки»

КРБ.141ЕЕбд_41.03.00.00.000 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_31[3]*
ГОРБАНЬ Олександр

Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доцент
СЕМЕНОВ Анатолій

Полтава – 2026 року

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетики та постійного зростання вартості енергоресурсів особливої актуальності набуває підвищення енергоефективності технологічних процесів у промисловості, комунальному господарстві та агропромисловому комплексі. Значну частку електроенергії у цих галузях споживає насосне обладнання, яке широко використовується у системах водопостачання, водовідведення, зрошення, технологічного транспортування рідин та інших виробничих процесах. У зв'язку з цим удосконалення електроприводів насосних установок є одним із важливих напрямів зниження енергоспоживання та підвищення ефективності роботи інженерних систем.

Особливістю роботи насосних установок є змінний характер навантаження, який обумовлений нерівномірністю споживання води або технологічної рідини протягом доби. У традиційних системах електроприводу регулювання продуктивності насосів часто здійснюється дроселюванням або періодичним увімкненням і вимкненням насосних агрегатів. Такі способи керування є енергетично неефективними, призводять до значних втрат електроенергії, підвищеного зношування обладнання та погіршення надійності роботи системи.

Одним із найбільш ефективних напрямів підвищення енергоефективності насосних установок є використання частотно-регульованих електроприводів на базі асинхронних електродвигунів та перетворювачів частоти. Частотне регулювання дозволяє плавно змінювати швидкість обертання електродвигуна та продуктивність насоса відповідно до реальних потреб системи. Завдяки цьому забезпечується значне зниження енергоспоживання, покращується якість керування технологічним процесом, зменшуються механічні навантаження на обладнання та підвищується ресурс його роботи.

Разом з тим ефективність застосування частотно-регульованих електроприводів значною мірою залежить від правильного вибору електродвигуна, параметрів перетворювача частоти, структури системи керування та засобів захисту електропривода. Тому актуальним завданням є

розробка вдосконаленої системи електропривода насосної установки, яка забезпечить оптимальні режими роботи обладнання, підвищить енергоефективність та надійність функціонування насосної станції.

Метою роботи є розробка вдосконаленої системи частотно-регульованого електропривода насосної установки для підвищення енергоефективності, надійності та ефективності керування технологічним процесом подачі рідини.

Об'єкт дослідження – насосна установка системи водопостачання підприємства та її електропривод у режимах змінного технологічного навантаження.

Предмет дослідження – процеси керування та регулювання швидкості асинхронного електродвигуна насосної установки за допомогою частотно-регульованого електропривода.

Методи дослідження – аналітичні методи розрахунку електромеханічних характеристик асинхронних електродвигунів, методи моделювання режимів роботи електроприводів, техніко-економічний аналіз, а також методи вибору та обґрунтування електротехнічного обладнання і засобів автоматизації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

проаналізувати існуючі системи електроприводів насосних установок та визначити їх основні недоліки;

обґрунтувати доцільність застосування частотно-регульованого електропривода для насосної установки;

виконати розрахунок параметрів електродвигуна та електропривода насосного агрегату;

дослідити електромеханічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні;

розробити вдосконалену структурну та принципову схему керування електроприводом насосної установки;

виконати вибір апаратури керування, захисту та автоматизації;

оцінити енергетичну, економічну та екологічну ефективність впровадження розробленої системи;

визначити заходи з охорони праці та безпеки при експлуатації насосного обладнання.

Практична значимість роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи частотно-регульованого електропривода на насосних установках підприємств промисловості, комунального господарства та агропромислового комплексу. Реалізація запропонованого технічного рішення дозволить зменшити витрати електроенергії, підвищити ефективність використання насосного обладнання, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити надійну роботу систем водопостачання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНИХ УСТАНОВОК ТА ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Сучасний стан та особливості роботи насосних установок

Насосні установки широко застосовуються в системах водопостачання, водовідведення, енергетиці, хімічній і харчовій промисловості, а також у сільському господарстві. Їх основним призначенням є транспортування рідин та створення необхідного напору для забезпечення технологічних процесів або потреб споживачів. Значна кількість насосних станцій використовується у системах централізованого водопостачання, де необхідно підтримувати стабільний тиск у мережі незалежно від змін споживання протягом доби.

Основним елементом насосної установки є насосний агрегат, який складається з насоса, електродвигуна та допоміжного обладнання. Надійність і ефективність роботи насосної станції значною мірою визначається режимами роботи електропривода, оскільки саме він забезпечує перетворення електричної енергії у механічну енергію обертання робочого колеса насоса [1].

До складу типової насосної установки входять такі основні елементи:

насосний агрегат;

електродвигун;

система трубопроводів;

запірна та регулювальна арматура;

контрольно-вимірювальні прилади;

система автоматичного керування та захисту.

Структурна схема типової насосної установки наведена на рисунку 1.1.

Насосні установки можуть класифікуватися за різними ознаками: за типом насосів, за призначенням, за способом регулювання продуктивності, а також за умовами експлуатації. Найбільш поширеними є відцентрові насоси, які широко використовуються у системах водопостачання завдяки простоті конструкції, високій надійності та можливості роботи при значних витратах рідини [3].

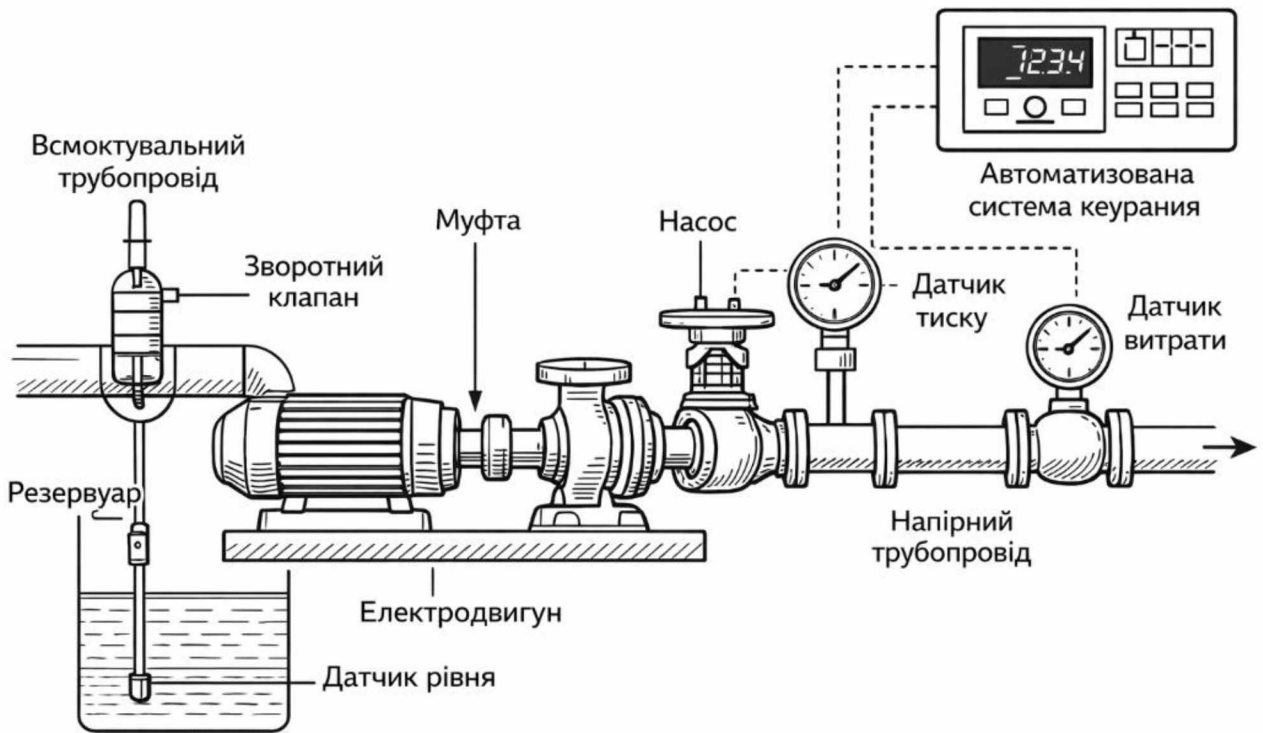


Рисунок 1.1 – Структурна схема насосної установки

Як видно з рисунка 1.1, насосна установка складається з електродвигуна, насоса, трубопроводів, запірної арматури та контрольно-вимірювальних приладів. Електродвигун передає механічну енергію на вал насоса, що забезпечує переміщення рідини трубопроводом та створення необхідного напору.

Найбільш поширені типи насосів, що застосовуються у системах водопостачання та промислових системах транспортування рідин, наведені у таблиці 1.1.

Як видно з таблиці 1.1, найбільшого поширення у системах водопостачання набули відцентрові насоси. Це пояснюється їх простою конструкцією, надійністю роботи та здатністю забезпечувати значні витрати рідини при відносно невеликому напорі.

У більшості насосних установок, що експлуатуються на підприємствах України, застосовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, які запускаються безпосередньо від електричної мережі. Такі електродвигуни мають просту конструкцію, високу надійність та значний ресурс

роботи, однак вони не забезпечують можливості плавного регулювання швидкості обертання [2].

Таблиця 1.1

| Тип насоса | Принцип дії | Основні переваги | Сфера застосування |
|-------------|---|--|-------------------------------------|
| Відцентрові | Перетворення енергії обертання робочого колеса у кінетичну та потенційну енергію потоку | проста конструкція, висока надійність, рівномірна подача | системи водопостачання, енергетика |
| Поршневі | Переміщення рідини за рахунок зворотно-поступального руху поршня | високий напір, точне дозування | хімічна промисловість |
| Гвинтові | Переміщення рідини гвинтовими роторами | можливість перекачування в'язких рідин | нафтова та харчова промисловість |
| Мембранні | Переміщення рідини за рахунок деформації мембрани | герметичність, робота з агресивними середовищами | фармацевтика, хімічна промисловість |

Особливістю роботи насосних установок є змінний характер навантаження. Протягом доби споживання води може змінюватися у декілька разів, що призводить до необхідності регулювання продуктивності насосів. У

ранкові та вечірні години спостерігається максимальне водоспоживання, тоді як у нічний час витрата води значно зменшується. Це створює нерівномірні режими роботи насосних агрегатів та потребує застосування ефективних методів регулювання їх продуктивності.

У традиційних системах регулювання подачі рідини здійснюється механічними способами: дроселюванням потоку за допомогою засувки або зміною кількості працюючих насосних агрегатів. При дроселюванні частина енергії витрачається на подолання штучно створеного опору у трубопроводі, що призводить до значних енергетичних втрат.

Такі методи регулювання мають низку суттєвих недоліків:

- значні втрати електроенергії при дроселюванні потоку;
- нестабільність параметрів тиску у трубопроводах;
- підвищене механічне навантаження на насосне обладнання;
- зниження ресурсу роботи насосів;
- складність автоматизації процесу керування.

Крім того, при прямому пуску асинхронних електродвигунів виникають значні пускові струми, які можуть у 5–7 разів перевищувати номінальні значення. Це призводить до додаткових навантажень на електричну мережу, падіння напруги та зниження надійності роботи електрообладнання.

За оцінками міжнародних енергетичних організацій, насосні системи споживають близько 20–25 % усієї електроенергії, що використовується у промисловості. У системах водопостачання цей показник може досягати 60–80 % від загального енергоспоживання підприємства. Тому підвищення ефективності роботи насосних агрегатів є одним із важливих напрямів енергозбереження [3].

У сучасних системах водопостачання все більшого поширення набувають автоматизовані системи керування насосними агрегатами, які дозволяють підтримувати задані параметри роботи системи, знижувати енергоспоживання та підвищувати надійність роботи обладнання. Одним із найбільш ефективних способів регулювання продуктивності насосів є застосування частотно-регульованих електроприводів.

Частотне регулювання дозволяє змінювати швидкість обертання електродвигуна шляхом зміни частоти живильної напруги. Це забезпечує плавне регулювання продуктивності насосної установки відповідно до реальних потреб системи водопостачання. Використання частотних перетворювачів дозволяє значно знизити енергоспоживання, підвищити ресурс роботи насосного обладнання та забезпечити стабільність гідравлічних параметрів системи.

Таким чином, аналіз сучасного стану насосних установок свідчить про необхідність впровадження енергоефективних систем керування електроприводами, що дозволяє підвищити економічність роботи насосних станцій, покращити якість водопостачання та забезпечити більш надійну експлуатацію обладнання.

1.2 Методи регулювання швидкості електроприводів насосних агрегатів

Ефективність роботи насосної установки значною мірою залежить від способу керування електроприводом. У практиці експлуатації насосних систем використовуються різні методи регулювання швидкості електродвигунів.

Механічні способи регулювання. До механічних методів належить дроселювання потоку за допомогою засувки або клапанів. У цьому випадку електродвигун працює з постійною швидкістю, а зміна продуктивності насоса здійснюється шляхом збільшення гідравлічного опору трубопроводу.

Недоліком цього методу є значні енергетичні втрати, оскільки частина енергії витрачається на подолання штучно створеного опору.

Ступінчасте регулювання продуктивності. Іншим способом є ступінчасте регулювання продуктивності шляхом увімкнення або вимкнення додаткових насосних агрегатів. Такий метод застосовується на багатонасосних станціях, однак він не забезпечує плавного регулювання витрати та може призводити до коливань тиску в системі.

Регулювання швидкості електродвигуна. До електричних методів регулювання швидкості відносяться:

регулювання опору в роторному колі (для двигунів з фазним ротором);

перемикання числа пар полюсів;
частотне регулювання швидкості.

Перші два методи використовуються обмежено через складність реалізації або низьку енергоефективність.

Найбільш перспективним методом є частотне регулювання швидкості асинхронного електродвигуна, при якому за допомогою перетворювача частоти змінюється частота та напруга живлення статора. При цьому швидкість обертання ротора змінюється пропорційно частоті живлення [4].

Застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє [5, 6]:

- забезпечити плавну зміну швидкості обертання насоса;
- зменшити пускові струми електродвигуна;
- знизити механічні навантаження на обладнання;
- запобігти гідродамам у трубопроводах;
- забезпечити економію електроенергії.

Дослідження показують, що використання частотно-регульованих електроприводів у насосних системах дозволяє зменшити споживання електроенергії на 30–50 % у порівнянні з традиційними системами керування [5].

Сучасні перетворювачі частоти оснащуються мікропроцесорними системами керування, що дозволяє інтегрувати насосні установки у автоматизовані системи керування технологічними процесами. Це дає можливість реалізувати функції автоматичного підтримання тиску, діагностики стану обладнання та захисту від аварійних режимів роботи.

1.3 Обґрунтування напрямку дослідження та постановка задач роботи

Аналіз сучасного стану насосних систем показує, що традиційні схеми електроприводів не забезпечують необхідного рівня енергоефективності та гнучкості керування технологічними процесами [5].

Основними недоліками існуючих систем є: значні втрати електроенергії при механічному регулюванні продуктивності насосів; високі пускові струми асинхронних електродвигунів; недостатній рівень автоматизації роботи

насосних установок; підвищене зношування обладнання через жорсткі режими пуску та зупинки.

Одним із найбільш ефективних шляхів вирішення цих проблем є використання частотно-регульованих електроприводів, які дозволяють змінювати швидкість обертання електродвигуна залежно від поточних потреб системи.

У зв'язку з цим у даній роботі основна увага приділяється розробці вдосконаленої системи частотно-регульованого електропривода насосної установки [6, 7].

Основними задачами дослідження є: аналіз конструкції та режимів роботи насосної установки; визначення вимог до електропривода насосного агрегату; дослідження методів регулювання швидкості асинхронних електродвигунів; розробка вдосконаленої системи частотно-регульованого електропривода; вибір електротехнічного обладнання для реалізації системи керування; оцінка енергетичної та економічної ефективності модернізації насосної установки.

Результатом виконання роботи має стати обґрунтування технічного рішення щодо модернізації системи електропривода насосної установки з використанням частотно-регульованого керування, що забезпечить підвищення енергоефективності, надійності та автоматизації роботи насосного обладнання.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу сучасного стану насосних установок встановлено, що значна частина таких систем, які експлуатуються на підприємствах промисловості, комунального господарства та агропромислового комплексу, працює на базі асинхронних електродвигунів із прямим пуском від мережі. Такі електроприводи характеризуються високою надійністю та простотою конструкції, однак не забезпечують можливості ефективного регулювання швидкості обертання насосів відповідно до змінних режимів роботи систем водопостачання. Це призводить до підвищених витрат електроенергії, зниження коефіцієнта корисної дії насосних установок та збільшення експлуатаційних витрат.

Встановлено, що традиційні способи регулювання продуктивності насосних агрегатів, зокрема дроселювання потоку за допомогою засувки або ступінчасте керування шляхом увімкнення та вимкнення насосів, є малоефективними з точки зору енергоспоживання. Такі методи супроводжуються значними гідравлічними втратами, нестабільністю параметрів тиску у трубопроводах, а також підвищеним зношуванням обладнання.

Аналіз сучасних підходів до керування електроприводами насосних установок показав, що найбільш ефективним і перспективним рішенням є використання частотно-регульованих електроприводів на базі асинхронних електродвигунів і перетворювачів частоти. Застосування частотного регулювання дозволяє забезпечити плавну зміну швидкості обертання насосів, оптимальне узгодження продуктивності агрегату з поточними потребами системи, зниження пускових струмів, а також зменшення механічних і гідравлічних навантажень на обладнання.

На основі проведеного аналізу визначено напрям подальших досліджень, який полягає у розробці вдосконаленої системи частотно-регульованого електропривода насосної установки з метою підвищення енергоефективності та ефективності керування її роботою

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Об'єкт дослідження та структура насосної установки

Об'єктом дослідження у даній роботі є насосна установка системи водопостачання, призначена для транспортування рідини з приймального резервуара до споживача через напірну мережу. Основу технологічного процесу становить переміщення рідини насосним агрегатом [8], який приводиться в дію електроприводом [9].

Насосна установка повинна забезпечувати необхідні параметри роботи системи водопостачання, зокрема підтримання заданого тиску та витрати рідини. При цьому режим роботи насосної станції характеризується змінним навантаженням, що зумовлено коливаннями водоспоживання протягом доби.

На рисунку 2.1 наведено структурну схему насосної установки з електроприводом.



Рисунок 2.1. Структурна схема насосної установки.

1 – приймальний резервуар; 2 – всмоктувальний трубопровід; 3 – насосний агрегат; 4 – асинхронний електродвигун; 5 – частотний перетворювач; 6 – напірний трубопровід; 7 – датчик тиску; 8 – витратомір; 9 – запірна арматура; 10 – напірний резервуар.

Вода із резервуара (1) надходить у насос (7) через трубопровід (12). Насос за допомогою електропривода (6), нагнітає рідину у напірний резервуар (2) по напірному трубопроводу (3). Для регулювання витрати води використовується регулююча засувка (8), встановлена на напірній лінії.

З метою запобігання зворотному потоку рідини при зупинці насоса в систему може бути інтегрований зворотний клапан (10). За умов, коли насос розташовується нижче рівня води в приймальному резервуарі або у випадку надлишкового тиску в ньому, на всмоктуючій магістралі передбачається монтажна засувка (11), яка перекривається в разі ремонту або зупинки агрегата [6].

Для захисту насоса від потрапляння сторонніх тіл на вході у всмоктувальний трубопровід встановлюється запобіжна сітка (13). Також для забезпечення ефективного запуску системи передбачений зворотний клапан, який дозволяє попередньо заповнити насос і всмоктуючий трубопровід водою.

Контроль за роботою насосної установки здійснюється за допомогою витратоміра (4), манометра (5) та мановакуумметра (9), що дозволяє оперативно оцінювати параметри тиску і витрати води в процесі експлуатації.

Одним із ключових параметрів, який визначає гідравлічне навантаження на насос, є геометричний напір H_{Γ} – різниця у висотах вільних рівнів рідини у приймальному та напірному резервуарах. Для переміщення рідини по трубопроводах необхідно подолати не лише цей напір, але й тиск у резервуарах ($p_2 - p_1$) та гідравлічні втрати $\sum h_w$, що виникають у всмоктувальному і напірному трубопроводах [7].

Таким чином, насосна установка [8] є складним енергоємним об'єктом, що вимагає оптимізації режимів роботи електропривода з метою підвищення енергоефективності та забезпечення надійності в умовах змінного водоспоживання.

2.2 Технічні вимоги до електропривода насосної установки

Електропривод насосної установки повинен забезпечувати надійну та енергоефективну роботу насосного агрегату при змінному навантаженні [1].

Найбільш поширеним типом електропривода для насосних установок є асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором. Вони характеризуються: високою надійністю; простотою конструкції; невисокою вартістю; широким діапазоном потужностей.

Однак при прямому підключенні до електричної мережі такі двигуни працюють з постійною швидкістю обертання, що не дозволяє ефективно регулювати продуктивність насосної установки [4].

Для підвищення енергоефективності сучасні насосні системи оснащуються частотно-регульованими електроприводами, у яких швидкість обертання електродвигуна змінюється шляхом регулювання частоти живлення.

Швидкість обертання асинхронного двигуна визначається виразом:

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s)$$

де f – частота живлення, p – число пар полюсів, s – ковзання.

Швидкість обертання асинхронного електродвигуна визначається частотою живлення та кількістю пар полюсів статора. При зміні навантаження змінюється ковзання двигуна (рис. 2.2), що призводить до зміни частоти обертання ротора.

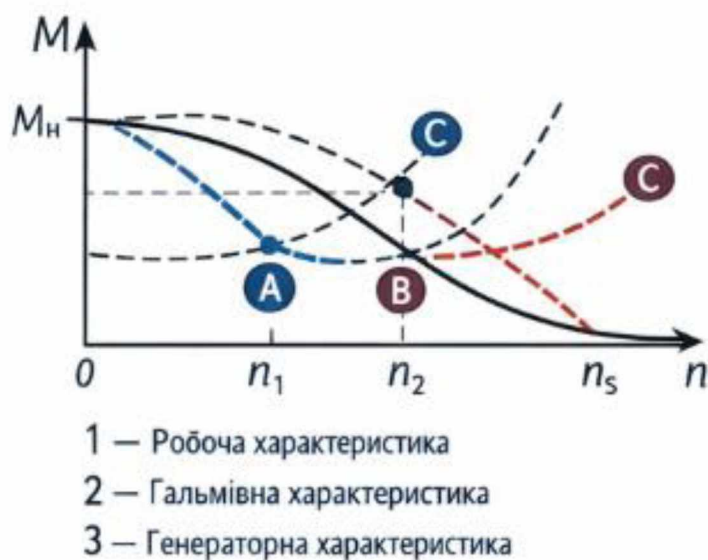


Рисунок 2.2 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна

Механічна характеристика асинхронного електродвигуна відображає залежність електромагнітного моменту двигуна M від частоти обертання ротора n або ковзання s . На механічній характеристиці виділяють декілька характерних точок [10].

Пускова точка відповідає моменту запуску двигуна, коли ковзання дорівнює одиниці. У процесі розгону частота обертання ротора зростає, а ковзання зменшується. При досягненні номінального режиму двигун працює з номінальним моментом M_n .

Максимальне значення моменту називається критичним моментом M_k . У цій точці двигун має найбільшу перевантажувальну здатність. Подальше зростання навантаження призводить до втрати стійкості роботи двигуна.

Для стабільної роботи електропривода робоча точка повинна знаходитися на спадній ділянці механічної характеристики. У цьому випадку при зміні навантаження виникає ефект саморегулювання: двигун автоматично змінює ковзання, підтримуючи відносно постійну швидкість обертання.

Застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє змінювати положення механічної характеристики шляхом регулювання частоти живлення, що забезпечує ефективне керування швидкістю обертання насосного агрегату.

Зміна частоти живлення дозволяє плавно регулювати швидкість обертання електродвигуна, що забезпечує ефективне керування продуктивністю насоса.

Основними вимогами до електропривода насосної установки є [12]: забезпечення плавного пуску електродвигуна; зменшення пускових струмів; можливість регулювання швидкості обертання; підтримання стабільного тиску у системі; захист від аварійних режимів роботи; підвищення енергоефективності установки

Використання частотного перетворювача дозволяє реалізувати [13]:

- плавний пуск і зупинку двигуна;
- регулювання швидкості обертання;
- автоматичне підтримання заданого тиску;
- зниження енергоспоживання насосної установки.

2.3 Структура системи керування частотно-регульованим електроприводом

Система керування електроприводом насосної установки призначена для забезпечення надійної, безпечної та енергоефективної роботи насосного агрегату в умовах змінного навантаження. Основними функціями системи керування є пуск і зупинка електродвигуна, регулювання швидкості обертання, підтримання необхідних технологічних параметрів, а також захист електрообладнання від аварійних режимів.

На рисунку 2.3 наведено структурну схему системи керування частотно-регульованим електроприводом насосної установки.

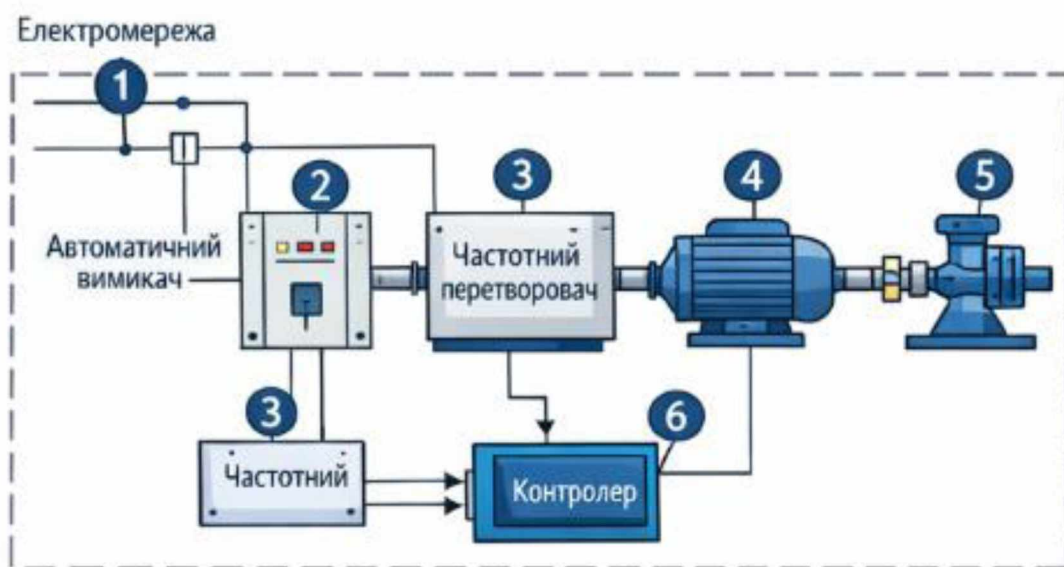


Рисунок 2.3 – Структура системи керування електроприводом

1 – електрична мережа 2 – автоматичний вимикач 3 – частотний перетворювач 4 – асинхронний електродвигун 5 – насос 6 – контролер або блок керування.

У сучасних насосних станціях для керування електроприводами широко застосовуються частотно-регульовані приводи на базі асинхронних електродвигунів та напівпровідникових перетворювачів частоти [14]. Такі системи дозволяють плавно змінювати швидкість обертання електродвигуна залежно від потреб технологічного процесу [15].

Структурна схема системи керування електроприводом насосної установки включає такі основні елементи: джерело електричної енергії

(електрична мережа); апарати комутації та захисту; частотний перетворювач; асинхронний електродвигун; насосний агрегат; датчики технологічних параметрів; контролер або блок керування.

Електроенергія з мережі подається через автоматичний вимикач або інший комутаційний апарат до частотного перетворювача. Частотний перетворювач змінює частоту та амплітуду напруги, що подається на обмотки електродвигуна. Завдяки цьому забезпечується регулювання швидкості обертання ротора.

Важливою складовою системи керування є датчики технологічних параметрів. У насосних установках найчастіше використовуються [16, 17]: датчики тиску; датчики витрати; датчики рівня рідини; температурні датчики.

Інформація від датчиків надходить до контролера або безпосередньо до частотного перетворювача, де здійснюється обробка сигналів і формування керуючих команд. Це дозволяє автоматично підтримувати заданий тиск або витрату рідини у трубопроводі.

Залежно від способу організації керування системи керування електроприводами поділяються на кілька типів.

Місцеве керування здійснюється безпосередньо з місця встановлення електропривода. У цьому випадку кнопки керування, пускачі та інші елементи розташовуються поруч з насосним агрегатом. Такий тип керування використовується при експлуатації окремих насосних установок або під час технічного обслуговування.

Дистанційне керування передбачає розміщення органів керування на щитах або пультах оператора. Це дозволяє керувати декількома насосними агрегатами з одного пункту управління та контролювати параметри їх роботи.

Автоматичні системи керування забезпечують функціонування насосної установки без постійної участі оператора. Контролер аналізує сигнали від датчиків і формує керуючі команди для частотного перетворювача.

Основними функціями автоматичної системи керування є [4, 15]: автоматичний пуск і зупинка насосів; плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна; підтримання заданого тиску або витрати; захист електродвигуна від перевантаження; контроль параметрів роботи установки.

Застосування частотно-регульованих електроприводів дозволяє значно зменшити пускові струми електродвигуна. У традиційних системах пусковий струм може перевищувати номінальний у 5–7 разів. При використанні частотного перетворювача пусковий струм обмежується значенням, близьким до номінального.

Крім того, частотно-регульований електропривод забезпечує плавний розгін і гальмування електродвигуна. Це дозволяє зменшити механічні навантаження на насос, трубопроводи та інші елементи системи.

Важливою перевагою частотно-регульованих електроприводів є можливість реалізації різних алгоритмів керування. Наприклад: підтримання постійного тиску в трубопроводі; підтримання заданої витрати рідини; робота за графіком навантаження; автоматичне перемикання між декількома насосами.

Сучасні частотні перетворювачі також оснащуються функціями діагностики та моніторингу, що дозволяє контролювати стан електродвигуна, напругу живлення, струм навантаження та інші параметри.

Таким чином, використання частотно-регульованих електроприводів у насосних установках забезпечує: підвищення енергоефективності; зменшення пускових струмів; зниження механічного зношування обладнання; покращення якості керування технологічним процесом; підвищення надійності роботи системи.

Висновки до розділу 2

У розділі проведено аналіз об'єкта дослідження – насосної установки системи водопостачання та визначено основні технічні вимоги до електропривода насосного агрегату. Розглянуто структуру насосної установки, принцип її роботи та основні елементи технологічної схеми, що забезпечують транспортування рідини від приймального резервуара до споживача через систему трубопроводів.

Встановлено, що ефективність роботи насосної установки значною мірою залежить від характеристик електропривода, режимів його роботи та способу керування. Проведений аналіз показав, що застосування асинхронних електродвигунів із прямим пуском від мережі не забезпечує можливості ефективного регулювання продуктивності насосного агрегату при змінному навантаженні.

Обґрунтовано доцільність використання частотно-регульованого електропривода, який дозволяє плавно змінювати швидкість обертання електродвигуна та забезпечувати оптимальний режим роботи насосної установки. Розглянуто основні вимоги до електропривода, а також принципи побудови системи керування, що забезпечує автоматичне регулювання параметрів роботи, контроль технологічних величин та захист обладнання від аварійних режимів.

На основі проведеного аналізу визначено, що застосування частотно-регульованих електроприводів у насосних установках дозволяє підвищити енергоефективність, покращити якість керування технологічним процесом та підвищити надійність роботи обладнання. Отримані результати є основою для подальшого розрахунку параметрів електропривода та розробки вдосконаленої системи керування насосною установкою у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Розрахунок навантаження та підбір насосного агрегату і електродвигуна

Одним із основних етапів проєктування електропривода насосної установки є визначення необхідних технічних параметрів насосного агрегату та електродвигуна. Правильний вибір обладнання забезпечує надійну роботу системи водопостачання, мінімізує енергоспоживання та підвищує ефективність експлуатації насосної станції.

Вихідні дані:

Робоче середовище: вода, $t=5...30^{\circ}\text{C}$. Умови експлуатації – «волога зона», що передбачає застосування електродвигуна із відповідним ступенем захисту.

Необхідна подача:

$$Q_{\text{ном}}=120 \text{ м}^3/\text{год}=0,0333 \text{ м}^3/\text{с}$$

Необхідний напір:

$$H_{\text{ном}}=32 \text{ м вод. ст. } (\approx 0,314 \text{ МПа})$$

Робочий режим насосної установки є змінним, оскільки протягом доби витрата води може змінюватися залежно від потреб споживачів. Для підтримання стабільного тиску в мережі використовується частотно-регульований електропривод.

Схема регулювання: частотне (VFD), діапазон швидкості орієнтовно 35...55 Гц

Гідравлічна потужність і розрахункова потужність на валу.

Гідравлічна потужність насоса визначається за формулою:

$$P_r = \rho g Q H P$$

де $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; Q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; H – напір, м.

$$P_r = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0333 \cdot 32 \approx 10,46 \text{ кВт}$$

Приймаємо ККД насоса $\eta_n = 0,78$, ККД двигуна $\eta_{дв} = 0,90$. Тоді потрібна потужність на валу двигуна:

$$P_{\text{вал}} = \frac{P_r}{\eta_n \eta_{дв}} = 14,9 \text{ кВт}$$

З урахуванням запасу (10–15%) приймаємо: $P_n = 15 \text{ кВт}$

Підбір насоса.

Для заданих $Q_{\text{ном}} = 120 \text{ м}^3/\text{год}$ та $H_{\text{ном}} = 32 \text{ м}$ доцільно застосувати відцентровий консольний (end-suction) насос промислової/комунальної серії (типовий клас – 65/80-200 при 1450 об/хв). Відцентрові насоси широко застосовуються у системах водопостачання завдяки таким перевагам: простота конструкції; надійність роботи; можливість роботи з великими витратами; зручність регулювання продуктивності.

У роботі приймаємо насос умовного типорозміру:

насос: «80-200», $n \approx 1450 \text{ об/хв}$, $P_{\text{вал}} \approx 15 \text{ кВт}$.

Основні параметри насосного агрегату наведені у таблиці 3.1.

Підбір електродвигуна. Для роботи з частотним перетворювачем доцільно застосувати 3-фазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

Основні причини вибору такого двигуна:

проста конструкція;

висока надійність;

невисока вартість;
сумісність із частотними перетворювачами.

Таблиця 3.1 – Прийняті параметри насосного агрегату

| Параметр | Значення |
|----------------------|--|
| Тип насоса | відцентровий, консольний (end-suction) |
| $Q_{ном}$ | 120 м ³ /год |
| $H_{ном}$ | 32 м |
| Орієнт. η_n | 0,78 |
| Номинальна швидкість | 1450 об/хв |

Приймаємо електродвигун типу

IE2/IE3, 4-полюсний (для 1450 об/хв), напруга 400 В, 50 Гц.

Приймаємо двигун типорозміру:

AIP160M4 (або аналог IE3)

$P_n=15$ кВт

$n\approx 1460$ об/хв

Перевірка за потужністю:

$$P_n \geq P_{вал} \Rightarrow 15 \geq 14,9 \text{ кВт}$$

умова виконується.

Підбір частотного перетворювача. Для 15 кВт двигуна приймаємо ПЧ із запасом по струму: ПЧ 18,5 кВт (400 В), режим керування: скалярний U/f або векторний (краще для стабільного тиску).

Основні функції перетворювача:

регулювання швидкості електродвигуна;

плавний пуск і зупинка;

обмеження пускових струмів;

підтримання заданого тиску.

Наявність входу для датчика тиску (4–20 мА) або підключення до ПЛК.

3.2 Обґрунтування режимів частотного регулювання

Для відцентрових насосів при зміні швидкості обертання (частоти) виконуються закони подібності [18, 19]:

$$Q \sim n, H \sim n^2, P \sim n^3$$

Це є ключовим аргументом на користь частотного регулювання: при зменшенні швидкості навіть на 20% потужність зменшується приблизно до $0,83^3=0,5120$, тобто майже вдвічі.

На рисунку 3.1 показано залежність споживаної потужності насоса від швидкості обертання електродвигуна.

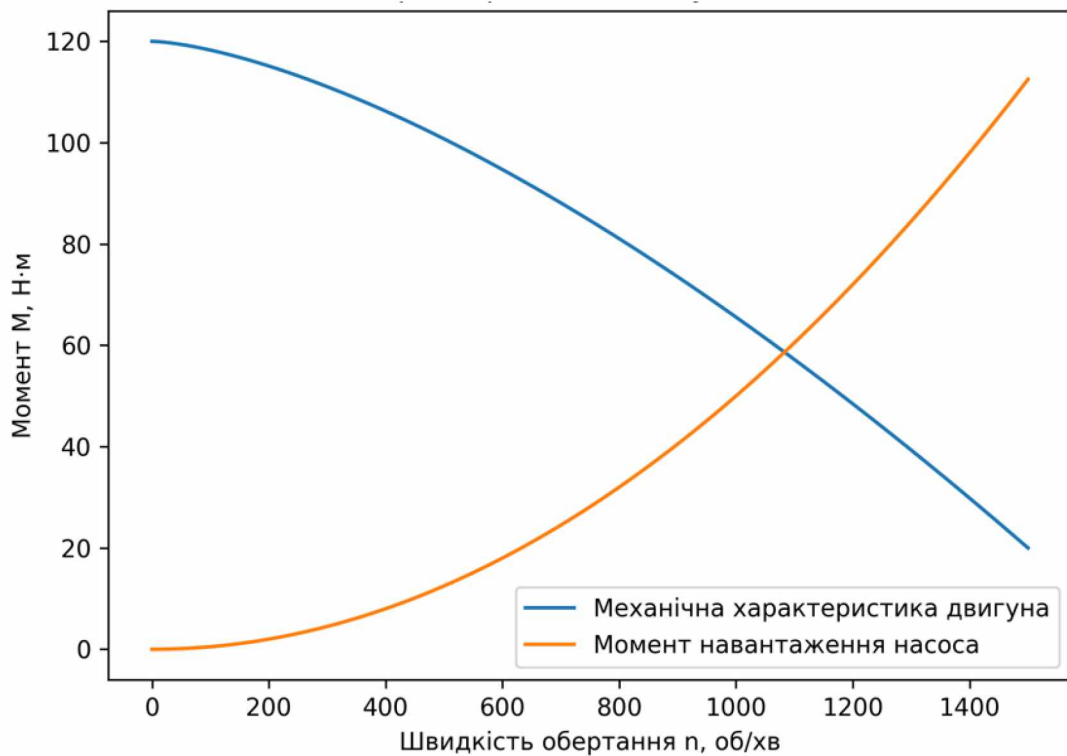


Рисунок 3.1 – Залежність потужності насоса від швидкості обертання

З графіка видно, що при зменшенні швидкості обертання навіть на невелику величину потужність насоса зменшується значно швидше. Саме це пояснює високу енергоефективність частотно-регульованого електропривода.

Приклад оцінки енергоспоживання при регулюванні

Нехай потрібно працювати на 80% швидкості:

$$n_2 / n_1 = 0,8$$

Тоді:

$$Q_2 / Q_1 = 0,8; H_2 / H_1 = 0,64, P_2 / P_1 = 0,512$$

Тобто при зниженні подачі на 20% (за рахунок частоти) споживана потужність може зменшитися приблизно на 49%, що недосяжно при дроселюванні засувкою (там «зайва» енергія просто втрачається в гідравліці).

3.3 Розрахунок механічних характеристик двигуна та навантаження насоса

Синхронна швидкість обертання асинхронного електродвигуна визначається за формулою:

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

Для 4-полюсного двигуна при 50 Гц:

$$n_s = 1500 \text{ об/хв}$$

Номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = (1500 - 1460) / 1500 = 0,0267$$

Кутова швидкість:

$$\omega_n = 2\pi n_n / 60 = (2\pi \cdot 1460) / 60 \approx 152,9 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент:

$$M_n = P_n / \omega_n = 15000 / 152,9 \approx 98,1 \text{ Нм}$$

Приймаємо типові співвідношення для двигуна з ПЧ:

$$M_{\max} / M_n \approx 2,5, \quad M_{\Pi} / M_n \approx 1,9$$

Тоді:

$$M_{\max} \approx 245 \text{ Нм}, \quad M_{\Pi} \approx 186 \text{ Нм}$$

Характеристика навантаження насоса. Для відцентрового насоса момент навантаження приблизно:

$$M_c(n) \sim n^2$$

а потужність:

$$P_c(n) \sim n^3$$

Ці залежності визначаються законами подібності гідравлічних машин.

Таким чином, навіть невелике зниження швидкості обертання електродвигуна призводить до значного зменшення споживаної потужності. Наприклад, при зменшенні швидкості обертання на 20 % потужність насоса зменшується приблизно до:

$$P_2 = P_1 \cdot (0,8)^3 = 0,512 P_1$$

тобто майже вдвічі.

Саме ця особливість роботи відцентрових насосів пояснює високу ефективність використання частотно-регульованих електроприводів у системах водопостачання.

Аналіз сумісної роботи двигуна і насоса. Робоча точка електропривода визначається перетином механічної характеристики електродвигуна та характеристики навантаження насоса.

Механічні характеристики електродвигуна та навантаження насоса наведено на рисунку 3.2.

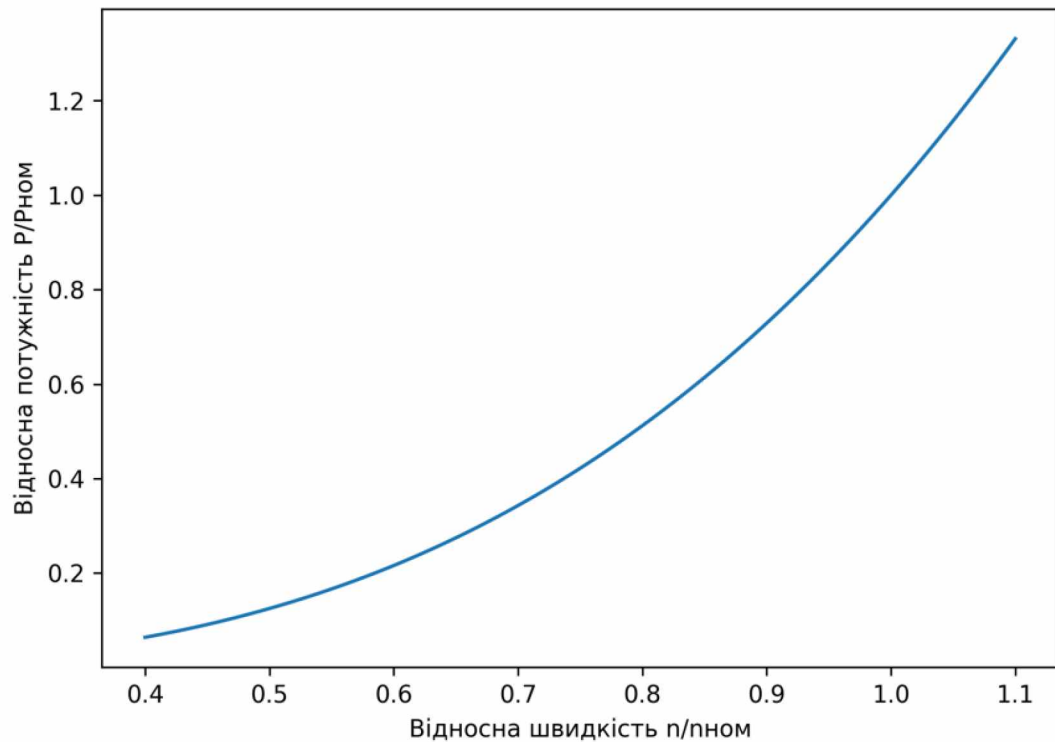


Рисунок 3.2 – Механічні характеристики електродвигуна та насосного навантаження

Як видно з рисунка 3.2, при зменшенні швидкості обертання момент навантаження насоса зменшується швидше, ніж момент електродвигуна. Це створює сприятливі умови для стабільної роботи електропривода в широкому діапазоні регулювання швидкості.

При використанні частотного перетворювача зміна швидкості обертання двигуна відбувається шляхом зміни частоти живлення. У цьому випадку зберігається приблизно постійне співвідношення напруги до частоти $U/fU/fU/f$, що дозволяє підтримувати номінальний електромагнітний момент двигуна у широкому діапазоні швидкостей.

Таким чином, застосування частотно-регульованого електропривода для насосної установки забезпечує [20]:

стабільну роботу електродвигуна при змінному навантаженні;
підвищення енергоефективності насосної установки;
зменшення механічних навантажень на обладнання;
плавне регулювання подачі та тиску у системі водопостачання.

Отже, результати проведеного розрахунку підтверджують правильність вибору електродвигуна та доцільність застосування частотно-регульованого електропривода для керування насосною установкою.

3.4 Оцінка перехідних процесів при пуску з частотним перетворювачем

На відміну від прямого пуску, частотний перетворювач забезпечує плавний розгін із заданим часом наростання частоти (ramp-up), обмежує струм та знижує ударні механічні навантаження.

Пуск електродвигуна безпосередньо від мережі супроводжується значними пусковими струмами:

$$I_{\text{п}} = 5 \dots 7 I_{\text{н}}$$

що може викликати: перевантаження мережі; падіння напруги; механічні удари у насосі.

Частотний перетворювач забезпечує плавний розгін електродвигуна.

Приймаємо час розгону:

$$t_{\text{пуск}} = 10 \text{ с}$$

еквівалентний момент інерції (двигун + робоче колесо, приведено до валу):

$$J_{\Sigma} = 0,25 \text{ кг/м}^2$$

(типове значення для 15 кВт)

Тоді середній прискорювальний момент (оцінка):

$$M_{\text{пр}} \approx \frac{J_{\Sigma}(\omega_n - 0)}{t_{\text{пуск}}} \approx 3,8 \text{ Нм}$$

Це означає, що: пуск відбувається без перевантаження двигуна; зменшуються механічні навантаження; запобігається виникненню гідроударів у трубопроводі.

Отже, при пуску з ПЧ потрібний динамічний момент невеликий, що підтверджує: відсутність ударних навантажень у механіці; зменшення гідроударів у трубопроводі (за правильних налаштувань); зниження пускових струмів (замість 5–7 I_n). На рисунку 3.3 подано графіки пуску з ПЧ:

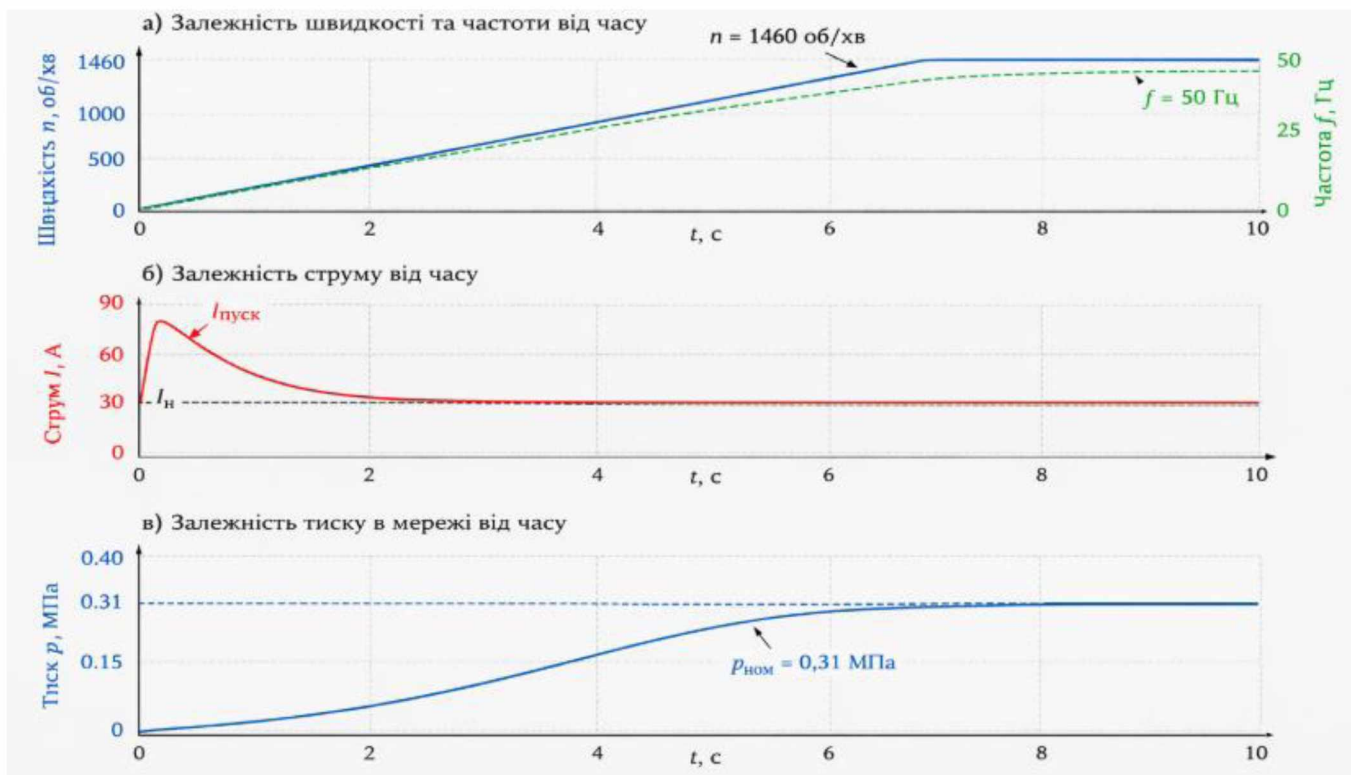


Рисунок 3.3 – Графіки пуску з ПЧ: $n(t)$ – швидкість/частота в часі (плавна «рампа»); $I(t)$ – струм пуску, обмежений; $p(t)$ – тиск у мережі, без стрибків.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У розділі проведено техніко-аналітичне обґрунтування електропривода насосної установки з використанням частотно-регульованого керування. На основі заданих параметрів роботи системи водопостачання виконано розрахунок необхідної продуктивності та напору насосного агрегату, що дозволило визначити потрібну потужність електропривода.

За результатами розрахунків підібрано відцентровий насос відповідного типорозміру та асинхронний електродвигун потужністю 15 кВт, який забезпечує необхідні експлуатаційні параметри роботи установки. Проведена перевірка показала, що обраний двигун має достатній запас потужності та відповідає умовам надійної та стабільної роботи в системі частотно-регульованого електропривода.

Проаналізовано механічні характеристики електродвигуна та навантаження насосного агрегату. Встановлено, що момент навантаження для відцентрового насоса змінюється пропорційно квадрату швидкості обертання, що створює сприятливі умови для застосування частотного регулювання та забезпечує ефективне керування продуктивністю установки.

Розглянуто перехідні процеси електропривода під час пуску із застосуванням частотного перетворювача. Встановлено, що використання частотного керування забезпечує плавний пуск електродвигуна, зменшує пускові струми та механічні навантаження на обладнання, а також запобігає виникненню гідравлічних ударів у трубопроводі.

Таким чином, застосування частотно-регульованого електропривода у насосній установці дозволяє підвищити енергоефективність системи, забезпечити гнучке регулювання подачі води відповідно до потреб споживачів та підвищити надійність роботи насосного обладнання.

РОЗДІЛ 4. ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

4.1 Аналіз режимів роботи електропривода насосної установки

Електропривод насосної установки працює в умовах змінного навантаження, що зумовлено коливанням водоспоживання протягом доби. Тому електродвигун не завжди працює на номінальному режимі, а змінює швидкість обертання відповідно до необхідної продуктивності системи водопостачання [4, 9].

Для електродвигунів насосних агрегатів зазвичай застосовується тривалий режим роботи S1, однак при використанні частотного регулювання фактичний режим є змінним, із переходами між різними значеннями швидкості [1, 10].

Для оцінки навантаження електропривода будується навантажувальна діаграма моменту $M(t)$ та тахограма швидкості $\omega(t)$. Такі діаграми дозволяють визначити характер зміни навантаження електропривода протягом робочого циклу насосної установки [2, 5].

Навантажувальна діаграма електропривода наведена на рисунку 4.1.

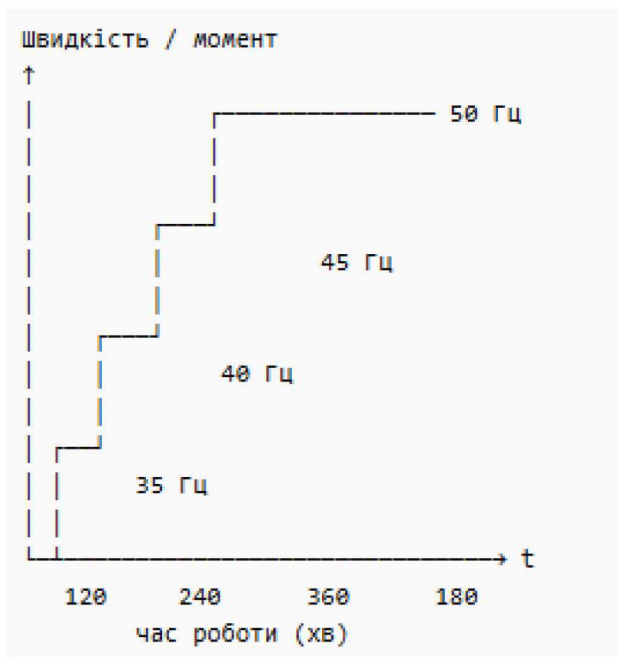


Рисунок 4.1 – Навантажувальна діаграма та тахограма електропривода насосної установки.

Як, видно, з рисунка 4.1, електропривод насосної установки працює у змінному режимі навантаження. При зменшенні витрати води швидкість обертання електродвигуна зменшується, що дозволяє знизити споживану потужність та підвищити енергоефективність системи [7, 18].

Для насосної установки приймаємо типовий добовий графік роботи (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Режими роботи насосної установки

| Відносна подача, Q/Q_n | Частота, Гц | Час роботи, хв |
|-----------------------------|----------------|-------------------|
| 0,7 | 35 | 120 |
| 0,9 | 45 | 240 |
| 1,0 | 50 | 360 |
| 0,8 | 40 | 180 |

Номінальна кутова швидкість двигуна:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{60}$$

де $n = 1460$ об/хв.

$$\omega_n = 152,9 \text{ рад/с}$$

При частотному регулюванні швидкість обертання визначається:

$$\omega_n = \omega_n \frac{f}{f_n}$$

де f – поточна частота, f_n – номінальна частота (50 Гц).

Для відцентрових насосів діють закони подібності [3, 11]:

$$Q \sim n, H \sim n^2, P \sim n^3$$

Розрахуємо основні параметри для різних режимів роботи (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Параметри роботи електропривода

| Частота, Гц | Швидкість, рад/с | Потужність, кВт |
|-------------|------------------|-----------------|
| 35 | 107 | 5,1 |
| 40 | 122 | 7,7 |
| 45 | 138 | 11 |
| 50 | 153 | 15 |

На основі отриманих даних будується навантажувальна діаграма електропривода.

Навантажувальна діаграма показує, що більшу частину часу електропривод працює з частковим навантаженням. Це підтверджує доцільність використання частотного регулювання, оскільки воно дозволяє зменшувати споживану потужність відповідно до фактичної потреби системи [12, 16].

4.2 Система керування електроприводом насосної установки

Для керування насосною установкою використовується система керування на основі частотного перетворювача, що дозволяє регулювати швидкість обертання електродвигуна шляхом зміни частоти живлення [6, 8].

Функціональна схема системи керування включає:

- асинхронний електродвигун;
- частотний перетворювач;
- датчик тиску;
- контролер керування;
- апарати захисту та комутації.

Для реалізації запропонованої системи регулювання використовується частотно-регульований електропривод, який забезпечує зміну швидкості обертання електродвигуна залежно від сигналів датчиків технологічних параметрів [12].

Функціональна схема системи керування насосною установкою наведена на рисунку 4.2.

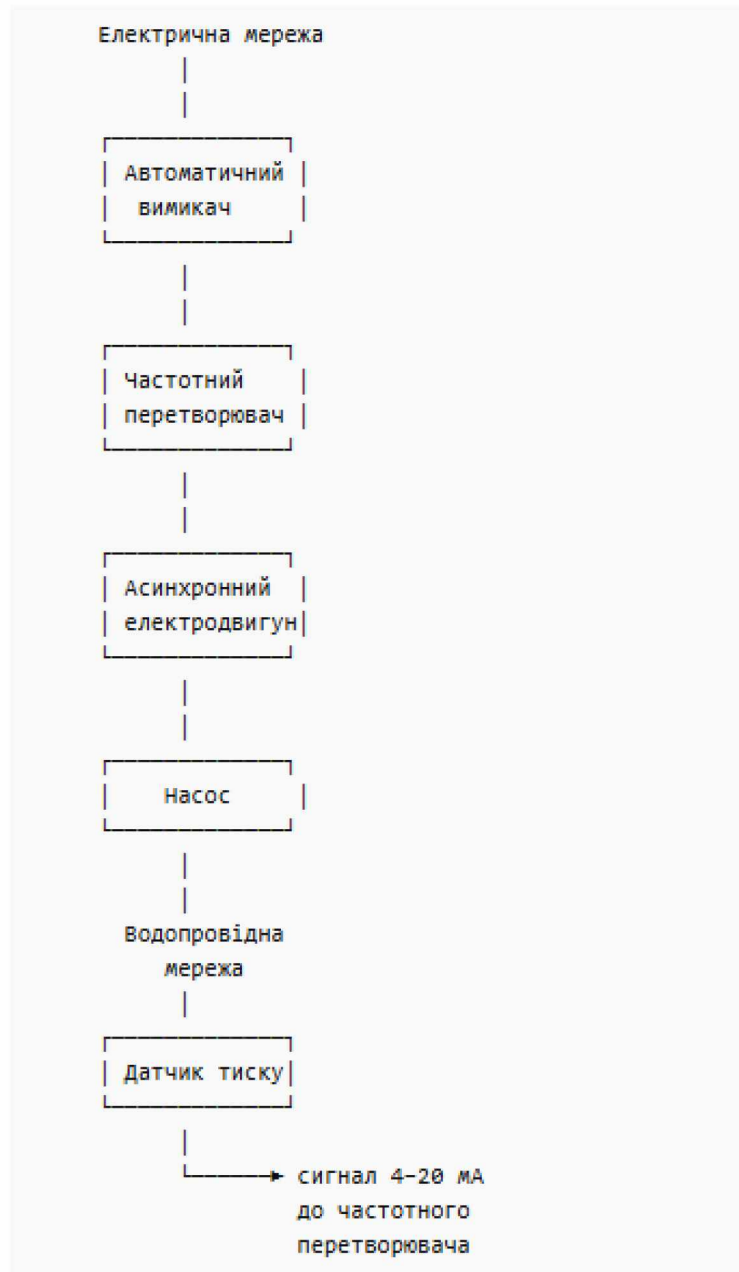


Рисунок 4.2 – Функціональна схема керування насосною установкою

Як видно з рисунка 4.2, сигнал від датчика тиску надходить до системи керування частотним перетворювачем, який змінює частоту живлення електродвигуна. Це дозволяє автоматично підтримувати необхідний тиск у водопровідній мережі [14].

Принцип роботи системи полягає у підтриманні заданого тиску у водопровідній мережі. Датчик тиску передає сигнал у систему керування, яка змінює частоту живлення електродвигуна.

Якщо тиск у мережі зменшується, частотний перетворювач збільшує частоту живлення двигуна, що призводить до збільшення швидкості обертання насоса та підвищення подачі води.

У разі зменшення споживання води частота зменшується, що знижує швидкість обертання насоса і зменшує енергоспоживання.

Застосування частотного регулювання дозволяє [7, 13]:

- плавню змінювати швидкість обертання електродвигуна;
- обмежувати пускові струми;
- зменшувати механічні навантаження на обладнання;
- підвищувати енергоефективність насосної установки.

4.3 Вибір апаратів керування та захисту

Для забезпечення надійної, безпечної та стабільної роботи електропривода насосної установки необхідно застосувати комплекс апаратів керування та захисту [4, 17]. Використання відповідних електротехнічних пристроїв дозволяє забезпечити нормальні режими роботи електродвигуна, своєчасно реагувати на можливі аварійні ситуації та запобігати пошкодженню електрообладнання.

До основних апаратів керування та захисту електропривода насосної установки належать:

автоматичний вимикач, який забезпечує захист електричного кола від струмів короткого замикання та перевантаження;

магнітний контактор, призначений для дистанційного вмикання та вимикання електродвигуна;

теплове реле, яке здійснює захист електродвигуна від тривалих перевантажень;

частотний перетворювач, що забезпечує регулювання швидкості обертання електродвигуна та плавний пуск насосного агрегату;

датчик тиску, який контролює тиск у трубопроводі та передає сигнал у систему керування;

кнопки керування та сигнальні пристрої, що використовуються для ручного керування та індикації режимів роботи установки.

Вибір апаратів керування та захисту здійснюється на основі електричних параметрів електродвигуна, зокрема номінального струму [2].

Номінальний струм електродвигуна визначається:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U\cos\varphi}$$

де $P_n = 15$ кВт; $U = 380$ В, $\eta = 0,9$; $\cos \varphi = 0,85$

$$I_n \approx 30\text{А}$$

Пусковий струм при прямому пуску може досягати:

$$I_p = (5 \dots 7) I_n$$

Тобто

$$I_p \approx 150 \dots 210 \text{ А}$$

Такі великі пускові струми створюють значне навантаження на електричну мережу та можуть спричинити падіння напруги і перегрів електрообладнання [5, 10]. Саме тому в сучасних насосних установках доцільно застосовувати частотно-регульовані електроприводи.

При використанні частотного перетворювача пуск електродвигуна відбувається плавно, із поступовим збільшенням частоти живлення. У цьому випадку пусковий струм, як правило, не перевищує номінального значення, що значно знижує навантаження на електричну мережу та підвищує надійність роботи всієї системи [12].

Основні параметри апаратів керування та захисту, які застосовуються у системі електропривода насосної установки, наведені у таблиці 4.3

Основні параметри апаратури наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні апарати керування

| Найменування | Основні параметри |
|------------------------|-------------------|
| Частотний перетворювач | 18,5 кВт, 380 В |
| Автоматичний вимикач | 40 А |
| Магнітний контактор | 32 А |
| Теплове реле | 25–32 А |
| Датчик тиску | 4–20 мА |

Застосування зазначених апаратів керування та захисту забезпечує надійну роботу електропривода насосної установки та дозволяє ефективно захистити електродвигун від можливих аварійних режимів. Зокрема, система захисту забезпечує відключення електродвигуна у випадках: коротких замикань; перевантаження; зниження напруги; аварійних режимів роботи.

Таким чином, правильний вибір апаратів керування та захисту є важливим етапом проектування системи електропривода насосної установки, що забезпечує надійну, безпечну та економічну експлуатацію обладнання.

4.4 Удосконалення системи керування

У традиційних системах водопостачання регулювання подачі насосів часто здійснюється шляхом дроселювання потоку за допомогою засувки або клапанів [3, 11]. При такому способі регулювання змінюється гідравлічний опір трубопроводної системи, що призводить до зменшення витрати рідини. Однак електродвигун при цьому продовжує працювати з практично постійною швидкістю обертання, споживаючи майже номінальну потужність. У результаті значна частина електричної енергії витрачається не на корисну роботу, а на подолання штучно створених гідравлічних втрат у системі.

Крім підвищених енергетичних втрат, дросельне регулювання має й інші недоліки. Воно призводить до нестабільності параметрів роботи системи, підвищеного зношування запірної арматури, виникнення коливань тиску в трубопроводах, а також ускладнює процес автоматизації роботи насосної станції.

У випадку різких змін витрати рідини можуть виникати гідравлічні удари, які негативно впливають на надійність трубопроводів та насосного обладнання.

З метою підвищення енергоефективності роботи насосних установок у сучасних системах водопостачання все частіше застосовуються електроприводи зі змінною швидкістю обертання. Одним із найбільш ефективних способів регулювання продуктивності насосів є використання частотно-регульованого електропривода. Такий спосіб керування ґрунтується на зміні частоти живильної напруги асинхронного електродвигуна, що дозволяє плавно змінювати швидкість обертання його ротора і, відповідно, продуктивність насоса [16].

У даній роботі запропоновано модернізацію системи керування насосною установкою шляхом впровадження частотно-регульованого електропривода. Використання частотного перетворювача дає можливість автоматично змінювати швидкість обертання електродвигуна залежно від фактичної потреби системи водопостачання. Це забезпечує більш ефективну роботу насосного агрегату та дозволяє значно зменшити витрати електроенергії.

Основними перевагами використання частотно-регульованого електропривода є:

1. Плавний пуск електродвигуна, що дозволяє уникнути різких механічних навантажень на насос і трубопроводи.
2. Зменшення пускових струмів, які при прямому пуску можуть у декілька разів перевищувати номінальне значення. Це знижує навантаження на електричну мережу та підвищує надійність роботи електрообладнання.
3. Зменшення ймовірності виникнення гідравлічних ударів у трубопроводах, оскільки швидкість обертання насоса змінюється поступово.
4. Підвищення енергоефективності насосної установки, оскільки споживана потужність насоса значною мірою залежить від швидкості його обертання.
5. Автоматичне підтримання необхідного тиску у системі водопостачання, що дозволяє забезпечити стабільну роботу всієї системи незалежно від коливань витрати води.

Згідно із законами подібності відцентрових насосів, при зміні швидкості обертання електродвигуна змінюються основні параметри роботи насоса: подача, напір та споживана потужність [3, 11]. При цьому потужність насоса змінюється пропорційно кубу швидкості обертання. Це означає, що навіть незначне зниження швидкості обертання може призвести до суттєвого зменшення споживаної потужності [3, 11].

За оцінками спеціалістів у галузі енергетики, використання частотно-регульованих електроприводів у насосних системах дозволяє зменшити споживання електроенергії на 20–40 % у порівнянні з традиційними способами регулювання продуктивності. Економія електроенергії досягається завдяки більш раціональному використанню енергії та відсутності додаткових гідравлічних втрат [16].

Крім економії електроенергії, застосування частотного регулювання має позитивний вплив на надійність та довговічність обладнання. Завдяки плавному пуску та регулюванню швидкості обертання зменшується механічне навантаження на насос, підшипники та муфти. Це дозволяє знизити інтенсивність зношування елементів насосного агрегату та збільшити термін їх експлуатації.

Таким чином, модернізація системи керування насосною установкою шляхом впровадження частотно-регульованого електропривода є технічно та економічно доцільним рішенням. Використання таких систем дозволяє підвищити енергоефективність роботи насосної станції, покращити стабільність параметрів водопостачання та забезпечити більш надійну експлуатацію обладнання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У четвертому розділі роботи було розглянуто питання вибору апаратів керування та захисту електропривода насосної установки, а також обґрунтовано застосування частотно-регульованого електропривода для підвищення ефективності роботи системи.

Визначено номінальний струм електродвигуна потужністю 15 кВт, який становить приблизно 30 А. Показано, що при прямому пуску асинхронного електродвигуна пусковий струм може досягати значень 150–210 А, що створює значне навантаження на електричну мережу та електрообладнання. Використання частотного перетворювача дозволяє здійснювати плавний пуск електродвигуна, обмежувати пускові струми та зменшувати механічні навантаження на насосний агрегат.

На основі проведеного аналізу було підібрано основні апарати керування та захисту електропривода, зокрема автоматичний вимикач, магнітний контактор, теплове реле, частотний перетворювач та датчик тиску. Використання такого комплексу апаратури забезпечує надійний захист електродвигуна від коротких замикань, перевантаження, зниження напруги та інших аварійних режимів роботи.

Застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє автоматично підтримувати необхідний тиск у системі водопостачання, зменшити енергетичні втрати та підвищити ефективність роботи насосної установки. Крім того, плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна сприяє зниженню зношування механічних елементів насосного агрегату та збільшенню терміну служби обладнання.

Таким чином, запропонована система керування насосною установкою на основі частотно-регульованого електропривода є технічно обґрунтованим та економічно доцільним рішенням, що дозволяє підвищити надійність, енергоефективність та стабільність роботи системи водопостачання.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕКОЛОГІЧНА ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЕКТНОГО РІШЕННЯ

5.1 Заходи з охорони праці при експлуатації насосної установки з частотно-регульованим електроприводом

Безпечна експлуатація електрообладнання є одним із найважливіших аспектів організації виробництва на підприємствах [21, 22]. Особливо це стосується насосних установок систем водопостачання, які оснащуються електроприводами на базі асинхронних електродвигунів. Електродвигуни цього типу широко застосовуються завдяки простоті конструкції, високій надійності та тривалому терміну експлуатації. Однак під час їх роботи необхідно дотримуватися комплексу організаційних та технічних заходів з охорони праці.

Насосні установки працюють у складних умовах експлуатації, які можуть супроводжуватися підвищеною вологістю, вібраціями, механічними навантаженнями та електричними небезпеками. У зв'язку з цим особлива увага приділяється захисту персоналу від ураження електричним струмом, запобіганню аварійним режимам роботи електрообладнання та підтриманню справного технічного стану електроприводів.

Потенційно небезпечні ситуації.

У процесі експлуатації електропривода насосної установки можуть виникати різні аварійні режими, які становлять небезпеку для персоналу та обладнання. До основних небезпечних факторів належать:

короткі замикання в електричних колах електродвигуна або в системі живлення;

перевантаження електродвигуна, що може спричинити перегрів обмоток;
зниження або зникнення напруги живлення;

обрив однієї з фаз живлення;

механічні пошкодження насосного агрегату;

підвищена вологість у приміщенні насосної станції.

Такі аварійні режими можуть призводити до перегріву електродвигуна, руйнування ізоляції, виходу обладнання з ладу та навіть пожежі.

Технічні заходи безпеки.

Для запобігання виникненню небезпечних ситуацій застосовуються технічні засоби захисту електропривода насосної установки. До них належать:

- автоматичні вимикачі для захисту від коротких замикань;
- теплові реле для захисту від перевантаження;
- захист від перекосу фаз;
- пристрої контролю напруги;
- система захисного заземлення електрообладнання;
- частотний перетворювач з вбудованими функціями захисту.

Частотні перетворювачі, що застосовуються у системі керування насосною установкою, мають додаткові функції захисту, зокрема:

- захист від перевантаження двигуна;
- контроль температури двигуна;
- захист від перевищення струму;
- захист від втрати фази;
- захист від перенапруги та зниження напруги.

Організаційні заходи.

До організаційних заходів охорони праці належать:

- проведення вступного та періодичного інструктажу персоналу;
- допуск до роботи лише працівників з відповідною групою з електробезпеки;
- регулярна перевірка технічного стану електрообладнання;
- ведення журналу технічного обслуговування насосної установки;
- періодичні вимірювання опору ізоляції електродвигуна.

Засоби індивідуального захисту.

Під час обслуговування насосної установки персонал повинен використовувати: діелектричні рукавиці; діелектричні килимки; інструмент з ізольованими ручками; захисний одяг.

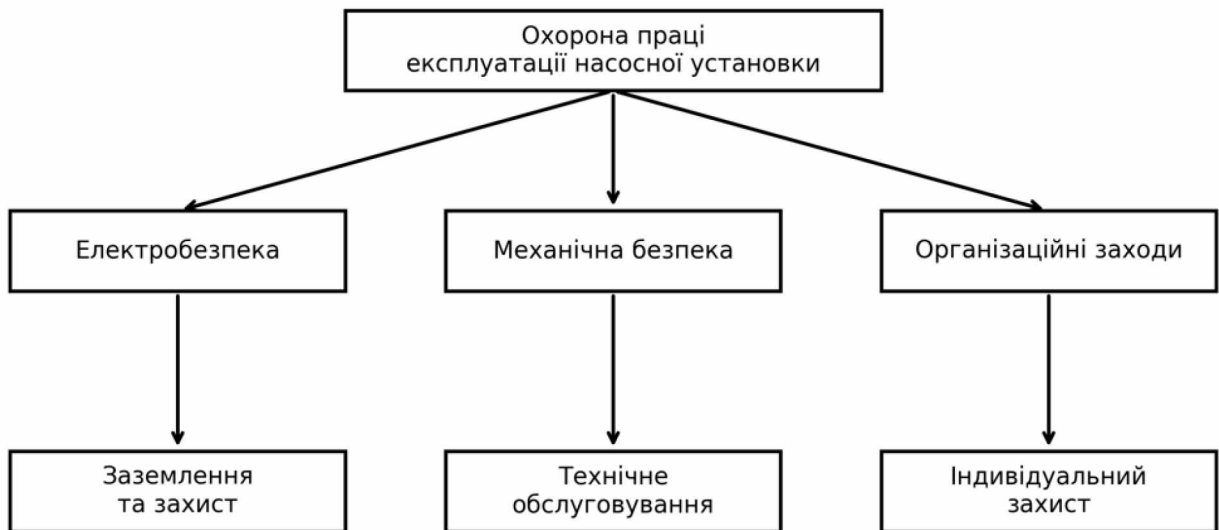


Рисунок 5.1 – Структура заходів охорони праці при експлуатації насосної установки.

Рисунок 5.1 відображає основні напрямки забезпечення безпечної експлуатації електропривода насосної установки [23]: електробезпеку, механічну безпеку, організаційні заходи, технічне обслуговування обладнання та застосування засобів індивідуального захисту.

Дотримання зазначених вимог дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію насосної установки, знизити ризик виробничого травматизму та підвищити надійність роботи електрообладнання.

5.2 Екологічна оцінка модернізації установки

У сучасних умовах важливим аспектом розробки технічних рішень є оцінка їхнього впливу на навколишнє середовище. Насосні установки, які використовуються у системах водопостачання, є значними споживачами електричної енергії, тому підвищення їх енергоефективності має позитивний екологічний ефект.

Традиційні насосні системи, що використовують нерегульовані електроприводи, характеризуються підвищеним енергоспоживанням. Це призводить до збільшення витрат паливно-енергетичних ресурсів на електростанціях та відповідного зростання викидів парникових газів.

Основні екологічні проблеми традиційних насосних установок [24, 25]:
підвищене споживання електроенергії;
підвищений рівень шуму;
гідравлічні удари в трубопроводах;
можливість витоків рідини у разі пошкодження системи.

Впровадження частотно-регульованого електропривода дозволяє суттєво зменшити негативний вплив насосної установки на довкілля.

До основних екологічних переваг модернізації належать:
зменшення споживання електроенергії;
зниження рівня шуму під час роботи насосної установки;
зменшення гідравлічних ударів у трубопроводах;
підвищення надійності системи водопостачання.

Завдяки оптимізації режимів роботи насосного агрегату енергоспоживання може бути знижене на 30–40 %, що сприяє скороченню викидів вуглекислого газу в енергетичному секторі [27].

Отже, модернізація насосної установки з використанням частотно-регульованого електропривода має позитивний екологічний ефект та відповідає принципам енергоефективності і сталого розвитку.

5.3 Економічна ефективність модернізації електроприводів насосної установки

Для оцінки економічної доцільності впровадження частотно-регульованого електропривода проведено розрахунок річного енергоспоживання насосної установки до та після модернізації.

Номинальна потужність електропривода: $P_n = 15$ кВт

Коефіцієнт використання потужності: $\eta_{\text{вик}} = 0,7$

Тривалість роботи на добу: $T_{\text{доб}} = 16$ год

Кількість робочих днів на рік: $D = 300$

Тариф на електроенергію: $C_{\text{ел}} = 6,86$ грн/кВт·год

Річне енергоспоживання до модернізації:

$$E_{\text{до}} = 15 \cdot 0,7 \cdot 16 \cdot 300 = 50400 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Річне енергоспоживання після модернізації. Очікуване зниження споживання електроенергії, $\Delta E = 35 \%$:

$$E_{\text{після}} = 50400 \cdot 0,65 = 32760 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Річна економія електроенергії:

$$\Delta E_{\text{річна}} = 50400 - 32760 = 17640 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

На рисунку 5.2 показано зменшення річного енергоспоживання після впровадження частотно-регульованого електропривода [25, 26]. Використання частотного перетворювача дозволяє оптимізувати режими роботи насоса відповідно до фактичної потреби у водопостачанні та знизити витрати електроенергії.

Річна економія коштів

$$\Delta C_{\text{річна}} = 17\,640 \cdot 6,86 \approx 120950 \text{ грн}$$

Витрати на модернізацію: частотний перетворювач – 35000 грн; монтаж і налагодження – 10000 грн; проєктні роботи – 5000 грн

Загальні витрати:

$$C_{\text{модерн}} = 50\,000 \text{ грн}$$

Термін окупності:

$$T_{\text{окуп}} = 50\,000 / 120\,950 \approx 0,41 \text{ року (близько 5 місяців)}$$

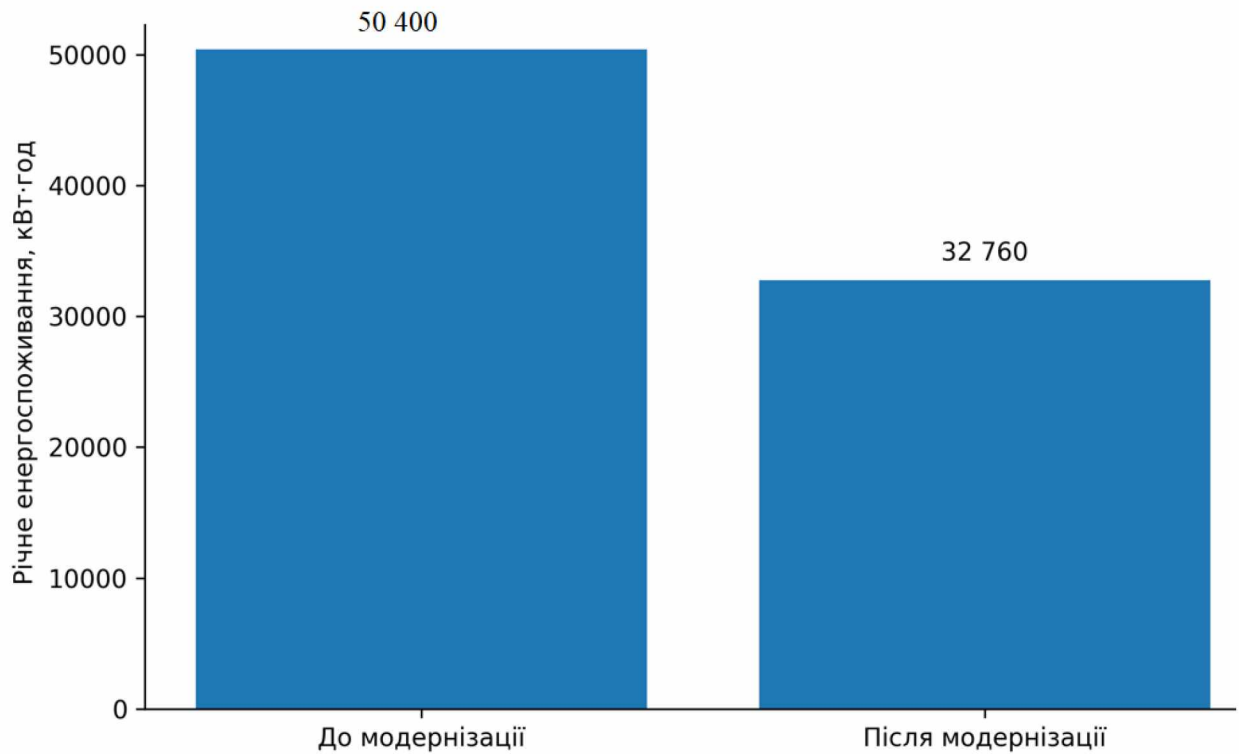


Рисунок 5.2 – Порівняння річного енергоспоживання насосної установки до та після модернізації

Проведений економічний розрахунок показав, що впровадження частотно-регульованого електропривода дозволяє суттєво знизити споживання електроенергії насосною установкою. Річна економія електроенергії становить понад 17 тис. кВт·год, що забезпечує економію коштів понад 120 тис. грн на рік.

Таким чином, модернізація насосної установки є економічно доцільною, а термін окупності впровадження частотного регулювання становить менше одного року.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці, екологічної та економічної ефективності впровадження частотно-регульованого електропривода насосної установки. Встановлено, що під час експлуатації насосного обладнання основними небезпечними факторами є дія електричного струму, можливість коротких замикань, перевантажень, зниження напруги, обриву фаз, а також механічні небезпеки, пов'язані з роботою насосного агрегату. Для забезпечення безпечної роботи запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів, що включає застосування автоматичних вимикачів, теплового захисту, захисного заземлення, засобів індивідуального захисту та регламентованого технічного обслуговування.

Проведена екологічна оцінка показала, що модернізація насосної установки шляхом впровадження частотно-регульованого електропривода має позитивний вплив на навколишнє середовище. Основний екологічний ефект досягається за рахунок зниження споживання електроенергії, зменшення непродуктивних втрат, зниження рівня шуму та скорочення ризику аварійних режимів, які можуть призвести до витоків рідини та пошкодження трубопровідної системи.

У результаті економічного розрахунку встановлено, що впровадження частотно-регульованого електропривода для насосної установки потужністю 15 кВт забезпечує суттєве зменшення річного споживання електроенергії. Річна економія становить 17640 кВт·год, а очікувана економія коштів – понад 120 тис. грн на рік. При загальних витратах на модернізацію на рівні 50 тис. грн термін окупності становить близько 0,41 року, тобто приблизно 5 місяців.

Таким чином, запропоноване проектне рішення є безпечним в експлуатації, екологічно доцільним та економічно ефективним. Використання частотно-регульованого електропривода забезпечує не лише покращення режимів роботи насосної установки, а й підвищення загальної ефективності функціонування системи водопостачання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У бакалаврській роботі розв'язано актуальне завдання підвищення ефективності роботи насосної установки шляхом розробки вдосконаленої системи частотно-регульованого електропривода.

2. У першому розділі виконано аналіз сучасного стану насосних установок та методів регулювання їх продуктивності. Встановлено, що традиційні способи керування, зокрема дроселювання потоку та ступінчасте вмикання насосів, супроводжуються значними втратами електроенергії, нестабільністю тиску в мережі та підвищеним зношуванням обладнання. Обґрунтовано доцільність використання частотно-регульованих електроприводів як найбільш ефективного засобу підвищення енергоефективності насосних систем.

3. У другому розділі досліджено об'єкт проектування — насосну установку системи водопостачання — та визначено основні технічні вимоги до її електропривода. Розглянуто структуру насосної установки, принцип її роботи, особливості режимів навантаження та побудову системи керування на базі частотного перетворювача. Показано, що використання регульованого електропривода забезпечує плавну зміну швидкості обертання електродвигуна, стабілізацію тиску та підвищення надійності роботи установки.

4. У третьому розділі виконано техніко-аналітичне обґрунтування параметрів насосного агрегату та електродвигуна. Для заданих умов роботи прийнято насос консольного типу з номінальною подачею 120 м³/год і напором 32 м, а також асинхронний електродвигун типу АІР160М4 потужністю 15 кВт. На основі розрахунків показано, що обраний двигун відповідає умовам роботи насосної установки. Також обґрунтовано застосування частотного перетворювача потужністю 18,5 кВт та проаналізовано механічні характеристики електропривода і перехідні процеси під час пуску.

5. У четвертому розділі досліджено режими роботи насосної установки, розроблено принципи побудови системи керування та виконано вибір апаратів захисту і комутації. Показано, що застосування частотно-регульованого

електропривода дозволяє автоматично підтримувати заданий тиск у системі, зменшити пускові струми, уникнути гідроударів у трубопроводах та знизити механічні навантаження на насосний агрегат. Удосконалення системи керування забезпечує більш гнучке та енергоефективне функціонування насосної установки.

6. У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці, екологічної та економічної ефективності проектного рішення. Встановлено, що модернізація системи керування насосною установкою є безпечною за умови застосування відповідних технічних і організаційних заходів. Економічний розрахунок показав, що впровадження частотно-регульованого електропривода забезпечує річну економію електроенергії 17 640 кВт·год та економію коштів понад 120 тис. грн, а термін окупності проекту становить близько 5 місяців.

7. Отже, поставлена в роботі мета досягнута. Розроблена система частотно-регульованого електропривода насосної установки дозволяє підвищити енергоефективність, надійність і якість керування роботою насосного обладнання, що підтверджує технічну, економічну та практичну доцільність її впровадження.