

**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: «Модернізація електроприводів насосної установки»

КРБ.14ЕЕбд\_31[3].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\_31[3]*  
СІРИЙ Максим

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

**Полтава – 2025 року**

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Аналіз сучасного стану насосних систем	10
1.2 Основні підходи до керування електроприводами насосних установок	11
Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ	14
2.1 Об'єкт дослідження	14
2.2 Вимоги до електропривода	16
2.3 Система керування електроприводом насосної установки	19
Висновки до розділу 2	22
РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ	23
3.1 Оптимізований розрахунок і підбір електродвигунів для насосної станції	23
3.2 Побудова та аналіз механічних характеристик електропривода насосної установки	25
3.3 Аналіз та побудова графіків перехідних процесів електропривода	28
Висновки до розділу 3	31
РОЗДІЛ 4 РЕЖИМИ РОБОТИ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ	32
4.1 Розрахунок діаграм навантаження електропривода	32

4.2 Вибір та опис схеми керування електроприводами	35
4.3 Вибір апаратів керування та захисту	37
4.4 Удосконалення системи керування насосною установкою	39 43
Висновки до розділу 4	
РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА БЕЗПЕЧНОСТІ, ЕКОЛОГІЧНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ЕЛЕКТРОПРИВІДНОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ	44
5.1 Заходи з охорони праці при експлуатації асинхронних двигунів насосних установок	44
5.2 Екологічна експертиза проектного рішення	46
5.3 Економічна ефективність модернізації електроприводів насосної установки	49
Висновки до розділу 5	51
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	52
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	54
Додаток А	56

## ВСТУП

У сучасних умовах постійного зростання цін на енергоносії особливу актуальність набуває питання енергоощадності у всіх сферах господарської діяльності. Зокрема, значну частину електроенергії в країні споживає насосне обладнання, що робить його модернізацію ключовим напрямом підвищення енергетичної ефективності. Найбільше енергоспоживання фіксується в системах водопостачання.

Особливість роботи насосних станцій полягає в необхідності адаптації до змін попиту на воду протягом доби. Відповідно, виникає потреба в регулюванні продуктивності насосів. Однак, відхилення від оптимального режиму роботи спричиняє підвищене енергоспоживання, що вимагає впровадження енергоефективних рішень в системах керування електроприводами насосів.

Найпоширенішим способом регулювання подачі води є зміна кількості задіяних насосних агрегатів. Проте прямий пуск асинхронних двигунів великої потужності з електромережі має технічні обмеження, зокрема щодо сили пускового струму та необхідності дотримання пауз між пусками. Це створює додаткові труднощі у забезпеченні гнучкого керування продуктивністю насосної установки. Найбільш ефективним рішенням є застосування регульованих електроприводів, які дозволяють змінювати швидкість обертання насосів залежно від потреб без суттєвих втрат електроенергії. Використання частотного регулювання забезпечує широкий діапазон зміни подачі при значному зниженні енергоспоживання, що компенсує витрати на встановлення перетворювального обладнання в короткі терміни.

Модернізація системи електроприводів насосної станції є важливою задачею, яка дозволяє не лише оптимізувати енергоспоживання, але й підвищити надійність та ефективність функціонування систем водопостачання.

**Мета роботи** – підвищення енергоефективності, надійності та керованості насосної установки шляхом модернізації її електроприводної частини з використанням частотно-регульованих електроприводів та вдосконаленої системи автоматизованого керування.

**Об'єкт розробки** – насосна установка, що входить до складу системи водопостачання підприємства, та її електроприводна частина в умовах змінного технологічного навантаження.

**Предмет розробки** – система електропривода насосної установки, її режими роботи, способи регулювання, захисту та керування в умовах змінного навантаження.

**Методика досліджень** – методи техніко-економічного аналізу, моделювання електромеханічних характеристик асинхронних електродвигунів, розрахунки динамічних та перехідних процесів, а також екологічну і економічну експертизу проектних рішень. Для обґрунтування технічних параметрів використано нормативну документацію, довідкові дані та програмні інструменти.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: проаналізувати існуючі схеми електроприводів насосних установок та виявити їх недоліки; обґрунтувати вибір типів електродвигунів для насосного агрегату, електрозасувки та допоміжного обладнання; провести розрахунки механічних і динамічних характеристик асинхронного двигуна; побудувати навантажувальні діаграми та графіки перехідних процесів; розробити вдосконалену схему керування електроприводом із частотним регулюванням; виконати вибір апаратури керування та захисту; провести оцінку енергетичної, екологічної та економічної ефективності запропонованої модернізації; визначити заходи з охорони праці при експлуатації насосного обладнання.

**Практична значимість та реалізація досліджень.** Практична значимість роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи модернізованого електропривода на насосних станціях підприємств енергетичної, промислової та агропромислової галузей. Реалізація запропонованого технічного рішення дозволить знизити витрати на електроенергію, продовжити термін служби обладнання, зменшити експлуатаційні ризики та підвищити ефективність автоматизованого управління технологічними процесами.

# РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.2 Аналіз сучасного стану насосних систем

Насосні установки відіграють важливу роль у забезпеченні безперервного транспортування рідин у багатьох сферах промисловості, енергетики, сільського господарства та житлово-комунального господарства. Особливо актуальним є їх застосування у системах централізованого водопостачання, де потрібно забезпечити стабільну подачу води до споживача з урахуванням коливань навантаження протягом доби та сезону.

Основним елементом будь-якої насосної станції є насосний агрегат, який складається з насоса та електропривода [1]. Від його технічного стану та режиму роботи залежить надійність, енергоефективність і довговічність всієї установки. Сучасна практика показує, що більшість насосів в Україні все ще функціонують із застосуванням нерегульованих асинхронних електродвигунів, пуск яких здійснюється безпосередньо з мережі [2]. Це зумовлює суттєві енергетичні перевитрати, особливо у випадках, коли система працює в умовах часткового навантаження.

Нерегульовані системи не здатні динамічно реагувати на зміну витрати води, тому регулювання здійснюється механічними засобами – дросельними засувками, перепускними клапанами або зміною кількості працюючих насосів. У результаті виникають додаткові гідравлічні втрати, підвищується знос обладнання, ускладнюється керування станцією.

У світовій практиці дедалі частіше впроваджуються технології автоматизованого керування насосними агрегатами із застосуванням частотно-регульованих електроприводів. Такі системи дозволяють точно узгоджувати продуктивність насоса з поточними потребами, знижуючи енергоспоживання до 30–50 % у порівнянні з традиційними схемами. Крім того, вони забезпечують плавний пуск і зупинку, мінімізуючи гідродари та динамічні навантаження на обладнання.

## 1.2 Основні підходи до керування електроприводами насосних установок

Вибір типу електропривода та схеми його керування напряму впливає на техніко-економічні показники роботи насосної установки. На сьогодні найбільш поширеними є асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором, які характеризуються високою надійністю, довговічністю, простотою експлуатації та низькою вартістю.

Однак стандартна схема їх підключення (безпосередньо до мережі) не дозволяє змінювати частоту обертання, що є критичним фактором при потребі динамічного регулювання витрати. У таких умовах змінюється гідравлічний опір, виникають втрати тиску, надмірне енергоспоживання, знижується ККД системи.

Для забезпечення змінного режиму роботи без перевантажень електродвигуна застосовуються різноманітні методи [3]:

- частотне регулювання, при якому за допомогою інверторів змінюється частота та напруга живлення статора. це забезпечує оптимальне керування швидкістю обертання без втрат потужності.
- реостатне регулювання (для двигунів з фазним ротором), що дозволяє змінювати опір у роторному колі. цей метод поступається частотному за енергоефективністю, але може використовуватись у старих системах.
- регулювання кількості пар полюсів – дозволяє перемикає фіксовані швидкості, проте не забезпечує плавності переходів.
- гальмування – динамічне, рекуперативне, противключенням – використовується для зупинки або реверсування обертання ротора, що важливо для аварійного керування насосами.

Найбільш ефективними визнані схеми із застосуванням частотних перетворювачів [4], які реалізуються за допомогою мікропроцесорного керування. Це дозволяє не лише регулювати швидкість обертання електродвигуна, але й інтегрувати його в загальну систему автоматизованого керування об'єктом.

Особливої актуальності набувають системи керування, здатні автоматично адаптуватися до зміни навантаження, підтримувати задані параметри тиску або витрати, забезпечувати захист від аварійних режимів (перевантаження, обрив фази, перегрів). При цьому важливим є вибір апаратної частини керування: магнітних пускачів, теплових реле, автоматичних вимикачів, сенсорних датчиків та засобів індикації [3].

#### *Визначення завдань та напрямку дослідження*

На підставі аналізу сучасного стану насосних систем та існуючих технічних рішень можна зробити висновок про необхідність комплексної модернізації електроприводної частини насосної установки. Основними передумовами для вибору напрямку дослідження стали [1]:

- неефективність традиційних схем пуску та регулювання асинхронних двигунів;
- потреба у зниженні енергоспоживання при збереженні або підвищенні продуктивності;
- прагнення до автоматизації та віддаленого моніторингу роботи агрегатів;
- необхідність підвищення ресурсу обладнання за рахунок плавного пуску, гальмування та реверсування.

Виходячи з цього, напрям дослідження в даній роботі орієнтований на:

- дослідження структури насосної установки та параметрів її роботи;
- аналіз вимог до електропривода та методів регулювання швидкості;
- розгляд способів пуску, гальмування та реверсування асинхронного двигуна;
- формування технічних вимог до системи автоматизованого керування;
- розробку та обґрунтування модернізованої схеми електропривода із застосуванням частотного регулювання;
- підбір апаратних компонентів для реалізації енергоощадного керування;
- визначення очікуваного ефекту від модернізації.



## Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу сучасного стану насосних установок встановлено, що більшість із них працює на основі нерегульованих асинхронних електродвигунів, що не дозволяє ефективно реагувати на зміну навантаження і призводить до значних енергетичних втрат. Використання традиційних методів регулювання подачі води (дроселювання, перемикання насосів) є малоефективним, особливо в умовах змінного водоспоживання.

Розгляд сучасних технічних рішень показав, що найперспективнішим напрямом є впровадження частотно-регульованих електроприводів, які дозволяють оптимізувати роботу насосних агрегатів, знижувати споживання електроенергії, збільшувати термін служби обладнання та покращувати якість керування процесами водопостачання. Такі системи забезпечують плавне регулювання швидкості обертання, надійний пуск, зупинку, гальмування та реверсування двигуна.

Проаналізовано основні методи керування електроприводами насосних установок, визначено переваги та недоліки кожного з них, а також окреслено особливості застосування сучасних систем захисту і керування.

На основі проведеного аналізу сформульовано основні технічні проблеми та обрано напрям дослідження, який полягає в розробці та обґрунтуванні технічного рішення щодо модернізації електропривода насосної установки з використанням частотного регулювання. Це дозволить підвищити енергоефективність, забезпечити гнучке керування і покращити надійність роботи обладнання в реальних умовах експлуатації.

## РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

### 2.1 Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження в даній роботі є насосна установка, призначена для подачі води із приймального резервуара до споживача через напірну мережу. Основу технологічного процесу становить переміщення рідини, що здійснюється за допомогою насосного агрегату, який приводиться в дію асинхронним електродвигуном. Станція виконує функцію підтримання необхідного тиску і витрати води відповідно до змін попиту в системі [5].

На рисунку 2.1 подано напівконструктивну схему насосної установки.

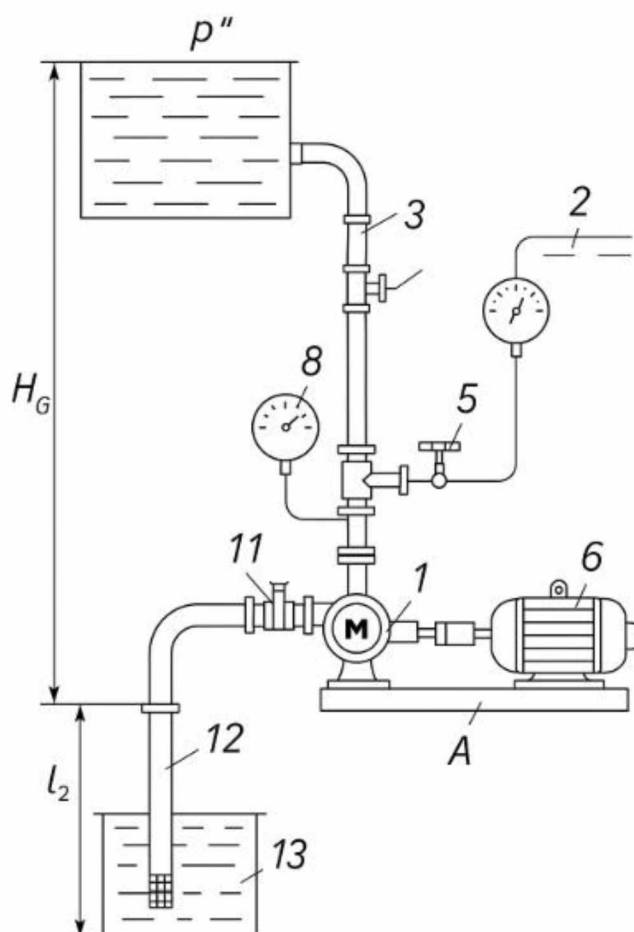


Рисунок 2.1. Схема насосної установки: 1 – приймальний резервуар; 2 – напірний резервуар; 3 – напірний трубопровід; 4 – витратомір; 5 – манометр; 6 – електродвигун; 7 – насос; 8 – регулююча засувка; 9 – мановакуумметр; 10, 14 – зворотний клапан; 11 – монтажна засувка; 12 – всмоктувальний трубопровід; 13

– запобіжна приймальна сітка

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 монтаж засувки (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  $H_{\Gamma}$  – 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 Вимоги до електропривода

Для приводу насосного обладнання найбільш часто використовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором. Це пов'язано з їх надійністю, простотою конструкції, відносно низькою вартістю та широким діапазоном потужностей – від часток кіловата до кількох мегават. Однак у стандартному виконанні такі двигуни не забезпечують можливості гнучкого регулювання частоти обертання, що обмежує їх енергоефективність при змінному навантаженні [1, 5].

Для забезпечення енергоощадної роботи насосних установок важливо, щоб двигун функціонував у режимі мінімального ковзання, що дозволяє уникнути надмірного нагрівання ротора та знизити втрати потужності.

Частота обертання асинхронного двигуна визначається швидкістю обертання магнітного поля статора ( $\omega_s$ ) та ковзанням ( $s$ ). Швидкість поля, у свою чергу, залежить від частоти живлення ( $f_1$ ) і кількості пар полюсів ( $p$ ).

Відповідно, є два основні методи регулювання [5]:

- зміна частоти напруги живлення шляхом застосування частотних перетворювачів (інверторів), які встановлюються в ланцюг живлення статора. Такий спосіб забезпечує плавне та широкодіапазонне регулювання швидкості обертання;

- перемикання кількості пар полюсів у самому двигуні. Цей метод дозволяє отримати лише обмежене число фіксованих швидкостей і не підходить для плавного регулювання.

Для асинхронних двигунів з фазним ротором можливі додаткові способи:

- реостатне регулювання – шляхом введення змінного опору у роторне коло;

- введення регульованої е.р.с. у ротор – через використання перетворювальних пристроїв (вентильні каскади або схеми з подвійним живленням).

Розвиток силової електроніки дозволив активно впроваджувати напівпровідникові перетворювачі частоти, що значно розширило сферу застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода.

До основних його переваг належать [9]:

- плавне регулювання швидкості обертання в широких межах;
- висока жорсткість механічної характеристики;
- енергоефективність завдяки зменшенню ковзання та оптимізації режиму роботи.

Серед недоліків – висока вартість перетворювачів для потужних установок і ускладнення реалізації режимів рекуперативного гальмування.

#### *Методи гальмування асинхронних двигунів*

Для зупинки асинхронного двигуна можуть використовуватись різні типи гальмування:

- Електродинамічне (динамічне) гальмування (рис. 2.2): реалізується шляхом подачі постійного струму до обмотки статора, в результаті чого виникає нерухоме магнітне поле, що створює гальмівний момент. Такий метод забезпечує поступове зменшення швидкості за рахунок перетворення кінетичної енергії у тепло.

Рекуперативне (генераторне) гальмування: можливе, коли ротор обертається швидше за синхронну частоту. У цьому випадку двигун переходить у генераторний режим, повертаючи енергію в мережу.

Припустимо, що в початковий момент часу наш двигун працював на характеристиці 1 в точці А, після перемикавання швидкості на більш низьку, він перейшов на характеристику 2 в точку В, а потім під дією гальмівного моменту досяг точки С, з меншою частотою обертів [2].

Гальмування противключенням (реверсивне): досягається зміною послідовності фаз живлення, що спричиняє обертання магнітного поля у протилежний бік. Для зменшення струмового навантаження при такому гальмуванні у схему вводять додаткові опори.

### *Реверсування асинхронного двигуна*

У багатьох промислових застосуваннях необхідне змінювання напрямку обертання валу електродвигуна – тобто його реверс. Це здійснюється перемиканням двох фаз живлення. Реверсивні схеми зазвичай виконуються із застосуванням двох магнітних пускачів, що забезпечують безпечне перемикання напрямку обертання.

Реверс є критично важливим у вантажопідйомних механізмах, кранах, ліфтах та засувках. У насосах та конвеєрних лініях реверсування переважно використовується як аварійний або допоміжний режим, наприклад, для екстреного зупинення.

### *Механічні характеристики асинхронного двигуна*

- Механічна характеристика відображає залежність обертового моменту двигуна ( $M$ ) від ковзання ( $s$ ) або частоти обертання ротора ( $n$ ). На залежності (рис. 2.4) виділяють такі ключові точки:  $M_{\text{пуск}}$  – момент на момент запуску ( $s = 1$ );  $M_n$  – момент при номінальній навантаженні;  $M_k$  – критичний (максимальний) момент, після якого двигун втрачає стійкість.

Для стабільної роботи двигуна необхідно, щоб робоча точка розташовувалась на спадній ділянці характеристики, де існує ефект внутрішнього саморегулювання: при зміні навантаження двигун змінює ковзання, зберігаючи оберти.

Асинхронні двигуни з фазним ротором дозволяють формувати реостатні характеристики: зміна опору в роторному колі дозволяє впливати на пусковий момент і режим розгону.

## **2.3 Система керування електроприводом насосної установки**

Система управління електроприводом насосної установки виконує функції керування пуском, зупинкою, регулюванням частоти обертання, контролем параметрів роботи та захистом електродвигуна від аварійних режимів. Умови експлуатації вимагають забезпечення надійності, гнучкості та безпечності управління, з урахуванням змінної продуктивності насосної станції [9].

Сучасні системи керування електроприводами поділяються на три основні типи за способом організації керування [6]:

- Місцеве керування – здійснюється безпосередньо з місця встановлення електропривода, коли пускові та зупинні пристрої розміщуються поруч із агрегатом. Цей тип зручний при обслуговуванні та регулюванні одиночних приводів.

- Дистанційне керування – передбачає розміщення органів керування на операторських пультах або щитах управління, з можливістю керування декількома об'єктами. Використовується в системах, де потрібен централізований контроль.

- Телемеханічне керування – передбачає передачу команд на віддалені об'єкти за допомогою автоматизованих каналів зв'язку, що особливо актуально для багатофункціональних та розгалужених систем, зокрема насосних станцій великої протяжності.

Залежно від участі оператора в процесі управління розрізняють такі режими керування [1, 5]:

- Ручний – оператор самостійно виконує усі керуючі дії.
- Напівавтоматичний – частина операцій виконується вручну, решта – автоматично.

- Автоматичний – усі етапи функціонування, включно з аналізом робочих параметрів, здійснюються без участі людини.

Для забезпечення ефективної та безперервної роботи насосної установки система управління повинна виконувати такі основні функції:

- автоматичне керування запуском та зупинкою електродвигуна;
- забезпечення обмеження пускового струму;
- реверсування напрямку обертання при необхідності;
- реалізація плавного регулювання швидкості обертання двигуна;
- контроль параметрів (струм, напруга, температура);
- захист від аварійних ситуацій: короткого замикання, перевантаження, обриву фази, зникнення або зниження напруги.

До складу типових схем керування входять:

- Магнітні пускачі або контактори для подачі та відключення живлення;
- Кнопки пуску/зупинки з фіксацією положення через допоміжні контакти;
- Теплові реле – для захисту від перевантаження;
- Автоматичні вимикачі або запобіжники – для захисту від струмів короткого замикання;
- Сигнальні елементи – лампи, звукові пристрої для індикації стану.

При використанні частотних перетворювачів у схемах керування можливе:

- задавання потрібної частоти обертання двигуна за допомогою потенціометрів, цифрових інтерфейсів або через ПЛК;
- плавний пуск і зупинка двигуна з урахуванням заданих параметрів прискорення/сповільнення;
- інтеграція з датчиками тиску або витрати для автоматичного регулювання режимів роботи насосів.

Таким чином, система управління повинна забезпечувати стабільність функціонування насосної установки, можливість гнучкого регулювання та високий рівень енергетичної ефективності, що є ключовим аспектом у контексті модернізації електроприводів.

## Висновки до розділу 2

У даному розділі проведено аналіз конструкції насосної установки, принципу її роботи, вимог до електропривода та системи керування. Встановлено, що насосна станція є складною гідромеханічною системою, де ефективність її функціонування значною мірою залежить від характеристик та режимів роботи електропривода.

Об'єктом дослідження виступає насосна установка, яка транспортує воду з приймального резервуара до напірного, забезпечуючи постійне водопостачання споживача.

Дослідження показало, що для приводу насосного агрегату доцільно використовувати асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором, які вирізняються простою конструкцією, надійністю та відносною дешевизною. Проте їх основний недолік — відсутність вбудованої можливості плавного регулювання швидкості — обмежує енергетичну ефективність системи при змінному навантаженні. Оптимальним рішенням є впровадження частотно-регульованих електроприводів, які забезпечують широкі можливості керування швидкістю обертання, знижують споживання електроенергії та підвищують загальну надійність роботи установки.

У розділі також розглянуто сучасні методи гальмування та реверсування асинхронних двигунів. Встановлено, що динамічне, рекуперативне та гальмування противключенням дозволяють ефективно зупиняти насосні агрегати, а в аварійних режимах — забезпечити їх безпечне знеструмлення або реверс.

Аналіз систем керування підтвердив, що до них висувуються вимоги щодо забезпечення надійного пуску, зупинки, захисту від аварійних режимів, автоматичного регулювання частоти обертання та дистанційного контролю за роботою агрегатів. Найбільш ефективною є автоматизована система керування із застосуванням частотних перетворювачів та сенсорних елементів контролю тиску і витрати.

## РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

### 3.1 Оптимізований розрахунок і підбір електродвигунів для насосної станції

Для забезпечення ефективної роботи насосної станції було проведено вибір електродвигунів [10] з урахуванням заданих параметрів обладнання та умов експлуатації.

Початкові дані:

- робоче середовище: волога зона.
- тип насосу: відцентровий.
- подача  $Q = 80 \text{ м}^3/\text{год}$ .
- напір  $H_1 = 0,2 \text{ МПа}$ .
- для електрозасувки: крутний момент  $M_{кр} = 2,5 \text{ кг}\cdot\text{м}$ .
- для маслонасосу: подача  $C_3 = 0,2 \text{ м}^3/\text{год}$ , тиск  $H_3 = 1 \text{ МПа}$ .

*Вибір електродвигунів для насосного агрегату*

За результатами таблиці 3.1 обрано насос типу 4К-45/55а з потужністю 7,5 кВт, швидкістю обертання 2900 об/хв.

Обрано електродвигун 4А112М2U3:

- потужність  $P_H = 7,5 \text{ кВт} \geq P_{розр} = 7,5 \text{ кВт}$
- $n_H = 2940 \text{ об/хв} \approx n = 2900 \text{ об/хв}$
- коефіцієнт завантаження  $K_{зав} = 1$
- $\Delta n = 0$

Двигун відповідає вимогам за потужністю і швидкістю [11].

Для електрозасувки (таблиця 3.2):

З таблиці 3.2 обрано електродвигун типу 4АА56А2U3:

- потужність  $P_H = 0,18 \text{ кВт} = P_{розр}$
- швидкість обертання  $n_H = 2800 \text{ об/хв} \approx 3000 \text{ об/хв}$

- $\Delta n = -0,07$ , що вкладається в допустиме значення

Таким, чином двигун відповідає заданим параметрам.

Для маслonaсосу (таблиця 3.3).

Згідно з таблицею 3.3 вибрано маслonaсос типу ЗНН0.2/25-3. Для його приводу використано електродвигун 4А71В2У3:

- потужність  $P_H = 1,1 \text{ кВт} > P_{\text{розр}} = 0,95 \text{ кВт}$ .
- $n_H = 2810 \text{ об/хв} = n = 2800 \text{ об/хв}$ .
- $K_{\text{зав}} = 0,86$ , що задовольняє нормативну умову.

Обрані електродвигуни задовольняють технічні вимоги кожного механізму та забезпечують необхідну надійність і енергоефективність насосної станції.

### **3.2 Побудова та аналіз механічних характеристик електропривода насосної установки**

Для обраного асинхронного двигуна типу 4А112М2У3 було проведено розрахунок і побудову механічної характеристики, що дозволяє оцінити динаміку та стійкість його роботи у складі насосного агрегату [13].

*Визначення основних характеристик*

1. Синхронна швидкість обертання:

$$n_c = 3000 \text{ об/хв}$$

2. Номінальне ковзання:

$$S_H = (n_c - n_H) / n_c = (3000 - 2900) / 3000 = 0,03$$

3. Розрахунковий коефіцієнт А:

$$A = (2,8 - 1) / (2,8 / 2 - 1) = 4,5$$

4. Критичне ковзання:

$$S_K = (S_H + \sqrt{(S_H \cdot A)}) / (1 + \sqrt{(S_H \cdot A)}) = 0,29$$

5. Допоміжний параметр  $g$ :

$$g = (S_k + 1/S_k - 2 \cdot M_{\max}/M_H) / (M_{\max}/M_H - 1) = 2,345$$

6. Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30 = 3,14 \cdot 2900 / 30 = 303,5 \text{ рад/с}$$

7. Номінальний момент:

$$M_H = P_H / \omega_H = 7500 / 303,5 = 24,71 \text{ Нм}$$

8. Критичний момент:

$$M_K = M_{\max} \cdot M_H = 2,8 \cdot 24,71 = 69,18 \text{ Нм.}$$

*Розрахунок моментів для різних значень ковзання*

Момент двигуна обчислюється за формулою Клосса:

$$M = (M_K \cdot (2 + g)) / ((1/S) + S + g)$$

Швидкість обертання:

$$n = n_c \cdot (1 - S)$$

Розраховані значення наведені в таблиці 3.5

*Розрахунок статичних і динамічних моментів*

Номінальний статичний момент:

$$M_{сн} = P_{розр} / \omega_H = 7500 / 303,5 = 24,71 \text{ Нм}$$

Початкове значення статичного моменту:

$$M_0 = 0,1 \cdot M_{сн} = 2,47 \text{ Нм}$$

Формула для обчислення статичного моменту при будь-якій  $n$ :

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \cdot (n/n_c)^2$$

Динамічний момент:

$$M_{дин} = M - M_c$$

Результати обчислень зведено до таблиці (оновлюється за потреби для побудови графіків).

Побудова механічних характеристик двигуна дозволила визначити робочі та граничні режими його експлуатації в складі насосної установки, а також оцінити динаміку розгону. Отримані характеристики підтверджують відповідність двигуна заданим технічним вимогам.

### **3.3 Аналіз та побудова графіків перехідних процесів електропривода**

Для побудови графіків перехідних процесів використано розраховану динамічну характеристику. Усі значення розбиті на інтервали за швидкістю обертання  $\Delta n$ . Кожному інтервалу відповідає середнє значення динамічного моменту –  $M_{д,сер}$ .

*Визначення сумарного моменту інерції*

Загальний момент інерції системи, зведений до валу двигуна, обчислюється за виразом:

$$\Sigma J = c \cdot J_{дв} + k \cdot J_{дв}$$

де:

$c$  – коефіцієнт, що враховує момент інерції з'єднувальних елементів (приймається рівним 1,3);

$k$  – коефіцієнт інерції механізму (приймається рівним 0,4);

$J_{дв}$  – момент інерції двигуна.

$$\Sigma J = 1,3 \cdot 0,01 + 0,4 \cdot 0,01 = 0,017 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

*Визначення часу на кожному інтервалі*

Тривалість прискорення в межах окремих інтервалів обчислюється за формулою:

$$\Delta t = (\Sigma J \cdot \Delta n) / (9,55 \cdot M_{д,сер})$$

Результати обчислень для кожного інтервалу наведено в таблиці 3.6.

### Перевірка умов пуску двигуна

Середнє значення пускового моменту визначається за формулою:

$$M_{\text{сер.п}} = 0,45 \cdot (M_k + M_{\text{п}}) = 0,45 \cdot (69,18 + 24,71) = 42,25 \text{ Нм}$$

Середній динамічний момент:

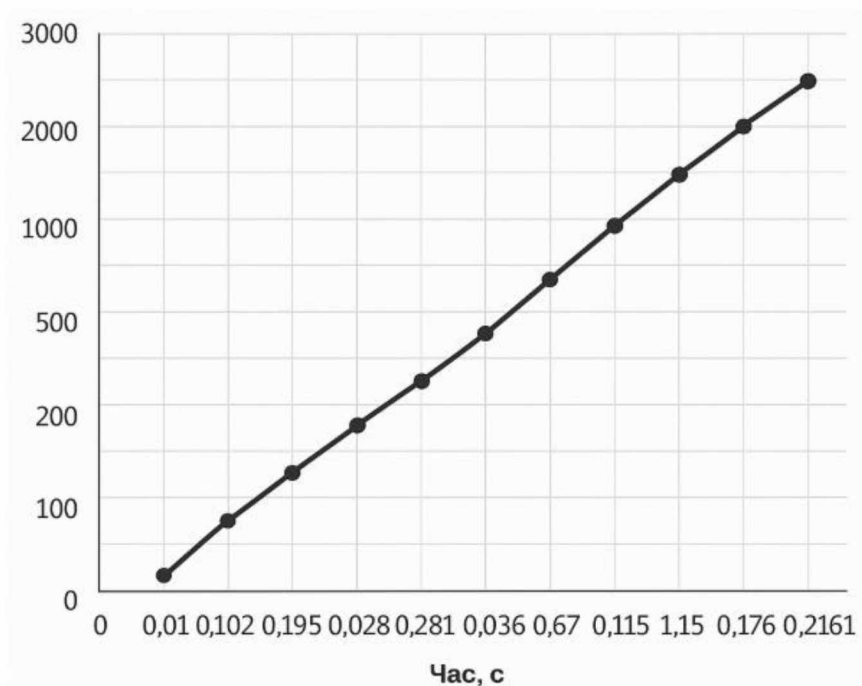
$$M_{\text{с.дин}} = (\Sigma J \cdot \omega_n) / t_p = (0,017 \cdot 303,5) / 0,01 = 515,95 \text{ Нм}$$

Мінімальний необхідний момент для забезпечення пуску:

$$M_{\text{необ.п}} = M_{\text{с.дин}} + M_o = 515,95 + 2,471 = 518,42 \text{ Нм}$$

Оскільки  $M_{\text{сер.п}} \leq M_{\text{необ.п}}$  ( $42,25 \leq 518,42$ ), умова надійного запуску виконується.

На рисунку 3.1 зображено графіки зміни швидкості, статичного і динамічного моментів протягом пуску двигуна. Це дозволяє оцінити відповідність динамічної поведінки електропривода вимогам системи насосної установки [14].



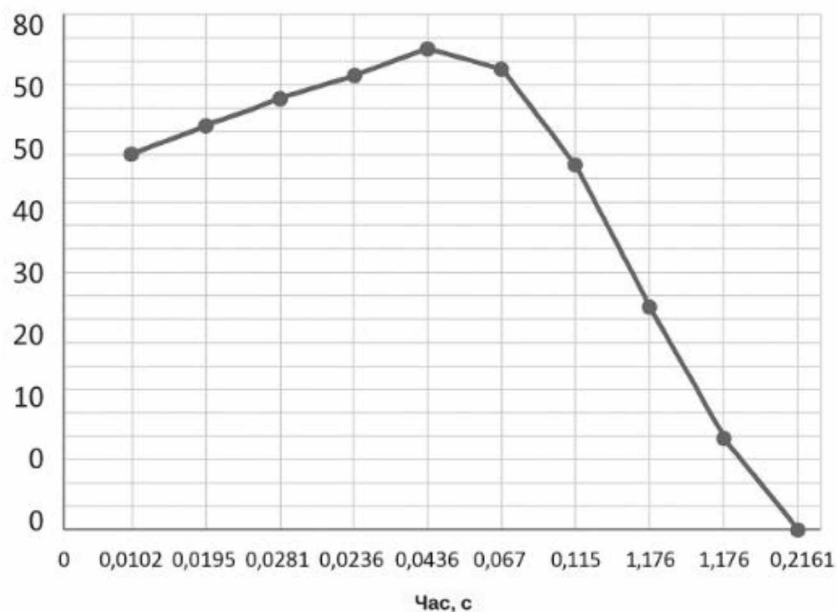


Рисунок 3.1 – Графіки перехідних процесів: а) залежність швидкості обертання від часу; б) залежність моменту від часу

Аналіз графіків підтверджує, що електропривод забезпечує надійний запуск агрегату без перевищення динамічних навантажень, що свідчить про доцільність його використання у вибраній конфігурації.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У даному розділі було здійснено комплексну техніко-аналітичну оцінку процесу вибору електродвигунів для основного обладнання насосної станції, а також побудовано механічні характеристики та графіки перехідних процесів для перевірки їх відповідності експлуатаційним вимогам.

На основі заданих параметрів насосного обладнання (подача, напір, тиск, крутний момент) було здійснено обґрунтований вибір асинхронних електродвигунів відповідних типів: 4A112M2У3 для приводу насоса, 4AA56A2У3 для електрозасувки та 4A71B2У3 для маслососа. Проведені розрахунки підтвердили відповідність обраних двигунів за потужністю, частотою обертання та допустимими навантаженнями. Значення коефіцієнтів завантаження, відхилення швидкості та ковзання перебували в межах нормативних обмежень, що засвідчує коректність вибору.

Побудовані механічні характеристики дозволили детально оцінити поведінку двигуна в динаміці. Визначено критичні та номінальні моменти, ковзання, а також підтверджено стабільність роботи в заданому діапазоні швидкостей. За результатами розрахунків встановлено, що двигун має задовільну динамічну стійкість та внутрішнє саморегулювання, що є важливою умовою для приводу насосного типу.

Розрахунок перехідних процесів і побудова відповідних графіків (швидкість обертання, статичний і динамічний моменти) підтвердили відсутність перевищення допустимих навантажень у момент пуску. Середній динамічний момент виявився значно вищим за пусковий, що гарантує безпечний і надійний запуск електропривода.

Проведений оптимізований підбір електродвигунів із подальшим аналізом механічних і динамічних характеристик підтвердив доцільність запропонованого варіанту електропривода для ефективної роботи насосної станції в умовах змінного навантаження та експлуатації у вологому середовищі.

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

### 4.1 Розрахунок діаграм навантаження електропривода

Навантажувальна діаграма електропривода відображає зміну моменту на валу двигуна протягом часу, тобто залежність  $M(t)$ . Методика її побудови залежить від конкретного режиму експлуатації електродвигуна [15].

Згідно з міжнародною класифікацією стандартних режимів роботи електричних машин, яка базується на характеристиках теплових процесів, виділяють такі режими:

- S1 — тривалий стабільний режим;
- S2 — короткотривалий робочий режим;
- S3 — повторно-короткотривалий режим без пусків;
- S4 — повторно-короткотривалий режим з пусками;
- S5 — аналогічний до S4, але з електричним гальмуванням;
- S6 — переривчасто-тривалий режим із навантаженням;
- S7 — переривчастий режим із реверсами;
- S8 — режим із перемиканням між кількома сталими швидкостями.

У випадках, коли електропривод працює при змінному навантаженні та чергуванні робочих і холостих фаз, разом із діаграмою  $M(t)$  будується тахограма — графік залежності швидкості обертання від часу  $\omega(t)$ .

У цьому розділі виконано побудову навантажувальної діаграми для електропривода насосної станції з урахуванням його багатошвидкісного режиму роботи S8, а також визначено основні розрахункові характеристики.

Вихідні умови:

- Тип двигуна: з розділу 3.
- Графік навантаження (табл. 4.1).

*Розрахунок кутової швидкості*

Для кожного значення продуктивності визначаємо відповідну кутову швидкість за формулою:

$$\omega_n = \omega_H \cdot Q_n / Q_H$$

де  $\omega_H$  – номінальна кутова швидкість;

$Q_n$  – поточна продуктивність;

$Q_H$  – номінальна продуктивність.

*Розрахунок моменту*

Залежність моменту при зміні продуктивності обчислюється через:

$$M_n = M_H \cdot (\omega_n / \omega_H)^2$$

*Розрахунок потужності*

Потужність при зміні швидкості визначається так:

$$P_n = P_H \cdot (\omega_n / \omega_H)^3$$

де  $P_H = 7,5$  кВт,  $M_H = 73,83$  Нм

Результати розрахунків наведені в таблиці 4.2.

*Побудова графіків*

На основі отриманих даних побудовано графіки зміни моменту та кутової швидкості за часом (рисунок 4.1):

- Навантажувальна діаграма  $M(t)$ ;
- Тахограма  $\omega(t)$ .

*Перевірка умови ковзання*

Критичне ковзання повинно перевищувати ковзання на найнижчій швидкості:

$$S_{\min} < S_k$$

$$S_{\text{мін}} = \frac{104,66 - 76,12}{44,66} = 0,272$$

$$0,29 \leq 0,272$$

Умова дотримана – електродвигун працює у безпечному температурному та швидкісному режимі при всіх рівнях навантаження.

## 4.2 Вибір та опис схеми керування електроприводами

Для забезпечення керування електроприводами насосної станції обрано релейно-контактну схему, яка представлена в додатку до роботи та на цифровому носії.

Розглянемо приклад функціонування схеми запуску трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, що реалізується через нереверсивний магнітний контактор Л (рис. 4.2). При натисканні кнопки "Пуск" відбувається замикання електричного кола живлення котушки контактора Л. У результаті він спрацьовує, і через силові контакти відбувається підключення обмоток статора двигуна М до електричної мережі. Паралельно з цим замкнуті допоміжні контакти 3–5 контактора Л, що дозволяє підтримувати коло живлення котушки навіть після відпускання кнопки "Пуск", утворюючи так звану "самопідхватку".

Для вимкнення двигуна слугує кнопка "Стоп", яка розмикає коло живлення котушки Л. Це призводить до відключення як силових контактів, що знеструмлюють обмотку статора, так і допоміжних контактів 3–5. Після відпускання кнопки "Стоп" живлення обмотки Л не відновлюється, і двигун залишається знеструмленим.

У зазначеній схемі передбачено захист двигуна від перевантаження за допомогою теплових реле Т1 і Т2. Ці пристрої включають в себе нагрівальні елементи, що підключаються послідовно із силовими контактами контактора Л.

Основним елементом є біметалічна пластина, яка реагує на температуру, та розмикаючий контакт, включений у коло керування обмоткою контактора.

У разі перевищення допустимого струму внаслідок перевантаження електродвигуна, нагрівальний елемент викликає деформацію біметалічної пластини. Ця деформація призводить до розриву електричного кола живлення котушки контактора, що, у свою чергу, знеструмлює обмотку статора двигуна та відключає його від мережі.

Застосування такої схеми забезпечує просте та ефективне керування електродвигуном і гарантує його захист від аварійних режимів, зокрема перевантаження.

### **4.3 Вибір апаратів керування та захисту**

Під час проектування системи електропривода насосної станції необхідно здійснити обґрунтований підбір апаратів керування і захисту, класифікуючи їх за основними функціональними групами:

- пристрої для захисту електрообладнання;
- пристрої дистанційного керування;
- елементи ручного керування;
- апарати для технологічного контролю параметрів;
- засоби світлової або звукової сигналізації.

Вибір типу апаратури залежить від рівня напруги силової частини. Якщо номінальна напруга не перевищує 1000 В, до засобів захисту зазвичай належать автоматичні вимикачі, запобіжники, теплові реле, струмові реле, реле контролю напруги. Для дистанційного керування застосовують магнітні пускачі або електромагнітні контактори.

У разі, коли силове коло працює на напрузі понад 1000 В, доцільно використовувати комплекс релейного захисту. Комутація у такому випадку виконується за допомогою масляних, елегазових або вакуумних вимикачів.

Для електроприводів насосної станції, обраних у попередньому розділі (див. пункт 3), виконуємо підбір необхідної апаратури керування та захисту, виходячи з номінальної напруги 220 В та частоти мережі 50 Гц.

#### *Розрахунок електричних струмів*

Номінальний струм для кожного електродвигуна визначається за формулою:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H}$$

Пусковий струм:

$$I_{\text{п}} = I_{*\text{п}} \cdot I_H$$

Струм для налаштування теплового захисту:

$$I_{\text{т.з}} = 1,25 \cdot I_H$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 4.3.

#### *Вибір апаратури*

На основі отриманих значень струмів та характеристик обладнання було здійснено підбір відповідних апаратів керування та захисту. Підібрані пристрої забезпечують надійне функціонування електроприводів, враховуючи специфіку навантаження, умови пуску, необхідність захисту від перевантаження і коротких замикань.

Результати вибору зведено до таблиці 4.4, додаток А.

### **4.4 Удосконалення системи керування насосною установкою**

Процес модернізації системи керування електроприводом насосної станції реалізовано у кілька етапів:

- аналіз недоліків наявної схеми керування;
- визначення ефективних підходів до її оновлення;
- обґрунтування вибору елементної бази для модернізації;
- виконання розрахунків технічних параметрів;
- опис оновленої схеми керування та її переваг.

Вихідна схема використовувала регулювання подачі насоса шляхом зміни положення електрозасувки. Такий метод спричиняє значні енергетичні втрати. Тому пропонується перейти до частотного керування електродвигуном для регулювання продуктивності насосної станції.

Варіант 1 – Регулювання напруги на обмотках статора

Для реалізації керування обрано тиристорний перетворювач напруги серії ПН-ТТЕ-100-6К-50(60)УХЛ 4. Розрахункові параметри наведено в таблиці 4.4.

Розраховано коефіцієнт розсіювання, кутову швидкість, струм намагнічування, індуктивність, опори та кути навантаження. Проведено побудову штучних механічних характеристик на основі отриманих даних [17]. Результати представлені в таблицях 4.5, 4.6 і на графіку (рисунок 4.3).

Варіант 2 – Частотне регулювання обертів електродвигуна

Обрано частотний перетворювач HYUNDAI N700E, що забезпечує діапазон регулювання частоти від 5 до 60 Гц. Умови вибору наведено в таблиці 4.7.

Розраховано параметри синхронної швидкості, відносної частоти, фазної напруги та моментів електродвигуна для різних частот і ковзань. Результати подано в таблицях 4.7–4.8.

Побудовано механічні характеристики (рисунок 4.4), що демонструють зміну моменту у відповідь на зміну частоти живлення [16]. Проведено перевірку дотримання закону частотного регулювання [17].

Модернізація системи керування за допомогою перетворювачів напруги та частоти дозволяє суттєво знизити енергоспоживання, забезпечити плавне регулювання швидкості обертання та підвищити ефективність функціонування насосної станції [18].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У розділі проведено всебічний аналіз режимів роботи електропривода насосної установки, побудовано навантажувальні діаграми та виконано техніко-аналітичне обґрунтування вибору схеми керування і апаратури захисту. Встановлено, що режим роботи відповідає міжнародній класифікації S8, що передбачає роботу на кількох рівнях навантаження з плавною зміною швидкості.

Розраховані значення кутових швидкостей, моментів і потужностей для кожного етапу навантаження дозволили побудувати навантажувальну діаграму та тахограму, які наочно відображають динаміку роботи електродвигуна в межах зміни продуктивності насосної станції. Перевірка умов роботи за критичним ковзанням підтвердила стабільність і надійність обраного режиму.

У межах розділу також реалізовано вибір та опис схеми керування електроприводом, яка базується на релейно-контактному принципі з тепловим захистом. Така схема забезпечує ефективний запуск та зупинку двигуна, а також його захист у випадках перевантаження.

Здійснено розрахунок номінальних, пускових і захисних струмів для трьох типів електродвигунів, що використовуються у насосній станції. Відповідно до отриманих значень підібрано апаратуру керування та захисту, що гарантує безперебійну і безпечну роботу всієї системи.

Найважливішим досягненням розділу є розробка двох варіантів модернізації системи управління: за допомогою тиристорного перетворювача напруги та частотного перетворювача. Результати розрахунків та побудовані штучні механічні характеристики підтвердили ефективність обох підходів. Застосування перетворювачів дозволяє забезпечити плавне регулювання швидкості обертання, зменшити втрати енергії, підвищити надійність та адаптивність системи керування до змінних умов роботи насосної установки.

## РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА БЕЗПЕЧНОСТІ, ЕКОЛОГІЧНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДНОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

### 5.1 Заходи з охорони праці при експлуатації асинхронних двигунів насосних установок

Безпечна експлуатація електроустановок, зокрема асинхронних трифазних електродвигунів напругою до 500 В, є одним із ключових аспектів охорони праці на підприємствах. Електродвигуни цього типу є широко поширеними завдяки простоті конструкції, надійності та універсальності. Проте під час їх використання необхідно дотримуватися комплексу технічних і організаційних заходів [19], спрямованих на запобігання аваріям, травматизму та передчасному виходу обладнання з ладу.

#### *Потенційно небезпечні ситуації*

У процесі експлуатації асинхронних електродвигунів можливе виникнення ряду аварійних режимів, що становлять небезпеку як для працівників, так і для електрообладнання. До таких ситуацій належать [20]:

- Короткі замикання в обмотках двигуна або зовнішніх колах, що можуть призвести до пожежі, вибуху або ураження електричним струмом;
- Перевантаження по струму, що спричинює перегрів обмоток, руйнування ізоляції та підвищення ризику займання;
- Зниження або зникнення напруги, що в окремих випадках викликає неконтрольовані пуски обладнання;
- Обрив однієї з фаз, що призводить до роботи на двох фазах з підвищеним струмом і небезпекою перегріву;
- Механічні пошкодження (заїдання валу, розбалансування, сторонні предмети), які можуть стати причиною як технічної несправності, так і травмування персоналу.

#### *Профілактичні заходи безпеки*

Для запобігання зазначеним небезпекам передбачаються такі заходи з охорони праці:

1. Забезпечення електричного захисту двигунів:

- установка автоматичних вимикачів з тепловими та електромагнітними розчіплювачами;
- використання теплових реле для запобігання тривалим перевантаженням;
- впровадження захисту від перекосів фаз і обриву живлення;
- захист від повторного автоматичного пуску після зникнення напруги (нульовий захист).

Організаційні заходи:

- проведення інструктажів та навчання персоналу з правил безпечної експлуатації електрообладнання;
- допуск до роботи лише працівників з відповідною групою з електробезпеки;
- ведення журналу обліку технічного обслуговування та перевірок стану захисної апаратури;
- планова заміна запобіжників, перевірка налаштувань теплових реле та розчіплювачів.

Технічне обслуговування:

- регулярний огляд двигунів на наявність слідів перегріву, вібрації, сторонніх запахів;
- перевірка надійності контактів, заземлення та герметичності клемних коробок;
- контроль стану ізоляції обмоток, вимірювання опору ізоляції;
- виявлення ознак зносу підшипників, розбалансування ротора або вібрацій.

Індивідуальний захист персоналу:

- використання діелектричних рукавиць, ковриків, інструменту з ізольованими ручками;
- забезпечення захисного заземлення всіх елементів установки;

- дотримання вимог ПУЕ (Правил улаштування електроустановок) та нормативних актів Держпраці.

#### *Вимоги до вибору і налаштування захисних пристроїв*

Особливу увагу при розробці заходів з охорони праці слід приділяти правильному вибору захисної апаратури. Вона повинна надійно реагувати на небезпечні струми, але не спрацьовувати помилково під час пуску двигуна, коли можливі значні (до 5–8 разів) перевищення номінального струму. Пускові й гальмівні струми мають бути враховані при налаштуванні захисту, щоб забезпечити як безпеку, так і безперебійну роботу обладнання.

Крім того, в складних випадках, наприклад, при виткових замиканнях всередині обмотки, захисні пристрої повинні забезпечити спрацювання до того, як ситуація переросте у повномасштабну аварію.

Забезпечення охорони праці під час експлуатації асинхронних електродвигунів передбачає комплексний підхід: технічний захист, кваліфіковане обслуговування, правильну організацію робіт і постійний контроль. Дотримання усіх заходів сприяє зниженню ризику травм, продовженню ресурсу електродвигунів та підвищенню загального рівня електробезпеки на підприємстві.

## **5.2 Екологічна експертиза проектного рішення**

У сучасних умовах сталого розвитку важливе значення має екологічна оцінка технічних рішень, що впроваджуються в промисловості та енергетиці. Насосні установки, які функціонують у водопостачальних та виробничих системах, є джерелом споживання електричної енергії та потенційного впливу на навколишнє середовище. З огляду на це, модернізація їх електроприводів повинна супроводжуватись екологічною експертизою, яка дозволяє оцінити доцільність та безпечність впроваджуваних змін [21].

Екологічна експертиза в даному випадку розглядає, з одного боку, потенційні негативні впливи традиційних електроприводних систем, а з іншого

— позитивні зміни, що очікуються в результаті їх модернізації із застосуванням частотно-регульованих приводів і автоматизованого керування.

*Екологічні проблеми, пов'язані з експлуатацією насосних установок*

Традиційні насосні системи з нерегульованими асинхронними двигунами мають низку екологічних недоліків:

- підвищене енергоспоживання, особливо в умовах часткових навантажень, що призводить до збільшення викидів парникових газів під час виробництва електроенергії;

- низький коефіцієнт корисної дії, що зменшує ефективність використання ресурсів;

- часті пуски з великим пусковим струмом, що сприяє зносу обладнання та зростанню потреби у технічному обслуговуванні й заміні компонентів, що створює додаткове навантаження на навколишнє середовище;

- недостатня адаптивність до змінного навантаження, що викликає гідроудари та призводить до розгерметизації трубопроводів, витоків рідини та ймовірного забруднення ґрунтів.

*Екологічні переваги модернізації електроприводів*

У результаті впровадження частотно-регульованих приводів та автоматизованої системи керування насосною установкою очікується суттєве зниження навантаження на довкілля за рахунок:

- зменшення споживання електроенергії на 30–50% за рахунок оптимізації режимів роботи двигунів відповідно до реального споживання води;

- підвищення енергоефективності системи за рахунок зменшення гідравлічних втрат та зносу механічних елементів;

- зниження рівня шуму завдяки плавному пуску, зупинці та роботі двигуна на оптимальних швидкостях;

- зменшення кількості аварійних ситуацій, які можуть призводити до розливу рідин та локального забруднення;

зменшення викидів CO<sub>2</sub> в енергетичному ланцюгу за рахунок скорочення енергоспоживання (особливо актуально при централізованому енергозабезпеченні, яке базується на ТЕС).

### *Розрахунок екологічного ефекту*

Для оцінки ефективності модернізації було проведено порівняння енергоспоживання до і після впровадження частотного регулювання. Якщо насосна установка в традиційній схемі споживає, умовно, 100% електроенергії, то після модернізації — не більше ніж 65–70%. Це дозволяє заощадити близько 2,25–3 МВт·год щомісяця (за середнім навантаженням 7,5 кВт), що еквівалентно зменшенню викидів CO<sub>2</sub> приблизно на 2,3 тони (враховуючи середній коефіцієнт викидів 0,77 кг CO<sub>2</sub>/кВт·год) [22].

Крім того, зменшення пускових струмів продовжує термін служби електрообладнання, знижуючи потребу в утилізації старих двигунів, кабельної продукції та систем захисту.

Проведений аналіз показав, що модернізація електроприводів насосної установки має позитивний екологічний ефект, зокрема:

- зниження енергоспоживання і, відповідно, викидів парникових газів;
- зменшення шумового та теплового навантаження на навколишнє середовище;
- зниження ризику аварійних витоків та забруднення;
- зменшення обсягів технічного обслуговування і пов'язаних з цим відходів.

Таким чином, модернізація є доцільною не лише з технічної та економічної, а й з екологічної точки зору, що відповідає принципам сталого розвитку та екологічної безпеки у сфері енергетики і водопостачання.

### **5.3 Економічна ефективність модернізації електроприводів насосної установки**

Для оцінки економічної доцільності впровадження частотно-регульованих електроприводів проведено розрахунок річного енергоспоживання до та після модернізації, а також обчислено очікувану економію коштів на електроенергію [23]. Вихідні техніко-економічні показники наведені в таблиці 5.1.

### *Розрахунок енергоспоживання*

Річне енергоспоживання до модернізації:

$$E_{\text{до}} = P_n \cdot \eta_{\text{вик}} \cdot T_{\text{доб}} \cdot D = 7,5 \cdot 0,7 \cdot 16 \cdot 300 = 25200 \text{ кВт/год}$$

*Річне енергоспоживання після модернізації:*

$$E_{\text{після}} = E_{\text{до}} \cdot (1 - \Delta E) = 25,200 \cdot 0,65 = 16\,380 \text{ кВт/ год}$$

*Річна економія електроенергії:*

$$\Delta E_{\text{річна}} = E_{\text{до}} - E_{\text{після}} = 25\,200 - 16\,380 = 8\,820 \text{ кВт/год}$$

*Річна економія коштів*

$$\Delta C_{\text{річна}} = \Delta E_{\text{річна}} \cdot C_{\text{ел}} = 8\,820 \cdot 6,86 = 60\,553,2 \text{ грн}$$

*Витрати на модернізацію*

Орієнтовні витрати на впровадження частотно-регульованого електропривода включають:

- Придбання частотного перетворювача – 35 000 грн;
- Встановлення, монтаж і налагодження – 10 000 грн;
- Проектна документація та технічні роботи – 5 000 грн;

*Загальні капіталовкладення:*

$$C_{\text{модерн}} = 35\,000 + 10\,000 + 5\,000 = 50\,000 \text{ грн.}$$

*Розрахунок терміну окупності*

$$T_{\text{окупн}} = C_{\text{модерн}} / \Delta C_{\text{річна}} = 50000 / 60553,2 \approx 0,83 \text{ року} \approx 10 \text{ місяців}$$

Проведений розрахунок підтвердив, що модернізація електроприводів насосної установки із застосуванням частотного регулювання є економічно доцільною. Завдяки зниженню енергоспоживання на 35% досягається щорічна економія понад 60 тис. грн, а термін окупності становить менше 1 року. Після цього економічний ефект буде накопичуватись у вигляді постійного зменшення витрат на електроенергію. Таке рішення сприяє не лише підвищенню ефективності функціонування насосної станції, а й відповідає вимогам енергоощадності та раціонального використання ресурсів.

## Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі бакалаврської роботи було розглянуто питання охорони праці, екологічної експертизи та економічної ефективності модернізації електроприводів насосної установки.

Визначено основні технічні та організаційні заходи з охорони праці під час експлуатації асинхронних електродвигунів. Зокрема, наголошено на важливості захисту від коротких замикань, перевантажень, обриву фаз, зниження напруги та механічних пошкоджень. Для цього рекомендовано застосовувати теплові реле, автоматичні вимикачі, системи нульового захисту та регулярне технічне обслуговування. Комплексне впровадження цих заходів дозволяє знизити ризики виробничого травматизму та підвищити електробезпеку.

Проведено екологічну експертизу проектного рішення. Встановлено, що використання традиційних нерегульованих приводів у насосних системах призводить до підвищеного споживання електроенергії, збільшення викидів парникових газів та зносу обладнання. Натомість впровадження частотно-регульованих електроприводів сприяє зниженню енергоспоживання на 30–50%, зменшенню шумового навантаження, ризику аварій та обсягів технічного обслуговування.

Виконано розрахунок економічної ефективності впровадженого технічного рішення. Встановлено, що завдяки модернізації насосної установки із застосуванням частотного перетворювача річна економія електроенергії становить 8820 кВт·год, що відповідає грошовій економії у розмірі 60553,20 грн. За умови капіталовкладень у сумі 50 000 грн термін окупності становить лише 10 місяців. Це свідчить про високу рентабельність і доцільність застосування частотно-регульованих електроприводів для насосного обладнання в умовах змінного навантаження.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що більшість існуючих установок в Україні функціонують із застосуванням нерегульованих асинхронних електродвигунів, які не забезпечують ефективної адаптації до змін навантаження. Це призводить до значних енергетичних втрат, зносу обладнання та ускладнення керування роботою насосних станцій. Найперспективнішим напрямом модернізації є впровадження частотно-регульованих приводів, що дозволяють плавно змінювати швидкість обертання двигуна відповідно до поточних потреб.

2. Здійснено вибір та перевірку технічних параметрів електродвигунів, зокрема для основного насосного агрегату, електрозасувки та маслонасосу.

3. Проведено розрахунок механічних характеристик двигуна, побудовано навантажувальні діаграми, графіки перехідних процесів і визначено режими роботи електропривода згідно з міжнародною класифікацією. Підтверджено відповідність обраних двигунів експлуатаційним вимогам насосної установки в умовах змінного навантаження.

4. У результаті аналізу механічних характеристик асинхронного двигуна 4A112M2U3 встановлено, що його пусковий момент (24,71 Нм) та критичний момент (69,18 Нм) забезпечують надійний запуск насосного агрегату без перевищення допустимих навантажень, що підтверджується результатами розрахунку динамічних процесів.

5. Побудовані штучні механічні характеристики для різних рівнів регулювання напруги та частоти живлення показали, що електропривод із частотним перетворювачем здатний ефективно працювати в широкому діапазоні продуктивності (від 70% до 100%), забезпечуючи стабільний крутний момент та плавне регулювання швидкості обертання.

6. Приділено увагу розробці та аналізу системи керування, вибору захисної апаратури та удосконаленню схеми управління з використанням частотних і тиристорних перетворювачів. Доведено, що застосування частотного регулювання дозволяє забезпечити ефективний пуск, гальмування, реверсування та дистанційне керування електроприводами.

7. Визначено потенційно небезпечні режими експлуатації асинхронних електродвигунів та сформовано комплекс заходів з їх запобігання. Здійснено екологічну експертизу проектного рішення, яка підтвердила зниження енергоспоживання, рівня шуму, викидів парникових газів та ризику забруднення довкілля.

8. За результатами розрахунку економічної ефективності встановлено, що річна економія електроенергії становить понад 60 тис. грн, а термін окупності модернізації – менше одного року.