

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Допущено до захисту
“ ” _____ 2025 р.
Зав. кафедри, д.т.н., професор
_____ Дідур В.В.

Кваліфікаційна робота (дипломна робота)

другий (магістерський)

(освітній рівень)

на тему **«ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ**
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З МЕТОЮ
ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ»

Виконала: студентка 2 курсу,
групи 21м-з-ім
Спеціальність _____ Н7
«Агроінженерія»
Ірина ЯСТРЕМСЬКА
(прізвище та ініціали)

Керівник _____ Юрій КОВАЛЬЧУК
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____ Ірина ЗАМОРСЬКА
(прізвище та ініціали)

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ магістр
 Спеціальність _____ Н7 «Агроінженерія»
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри
 _____ Дідур В.В.
 “ ____ ” _____ 20 ____ р.

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

_____ Ястремській Ірині Анатоліївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження параметрів насосної станції сільськогосподарського призначення з метою збільшення продуктивності»
 керівник роботи _____ Ковальчук Ю.О., к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“09” листопада 2023 р. № 01-06/256

2. Строк подання студентом роботи _____ 20.11.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Режими роботи автоматизованого електропривода водонасосної станції. Набір бібліотек програми Simulink.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

актуальність контексту енергозбереження у сільському господарстві, аналіз роботи асинхронного електроприводу в режимі динамічної роботи, аналіз роботи системи водопостачання через моделювання насосної станції, обґрунтування застосування насосних установок із регульованим електроприводом для забезпечення водопостачання сільськогосподарських господарств з техніко-економічного погляду.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	04.04.25 р.	
2.	Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень	05.05.25 р.	
3.	Розділ 2. Аналіз роботи асинхронного електроприводу в режимі динамічної роботи.	04.06.25 р.	
4.	Розділ 3. Аналіз роботи системи водопостачання через моделювання насосної станції	03.09.25 р.	
5.	Розділ 4. Охорона праці	01.10.25 р.	
6.	Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування	16.11.25 р.	
7.	Виконання презентаційної частини роботи	20.11.25 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	20.11.25 р.	

Студент_____
(підпис)Ірина ЯСТРЕМСЬКА
(прізвище та ініціали)**Керівник роботи**_____
(підпис)Юрій КОВАЛЬЧУК
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Ястремська І.А. Дослідження параметрів насосної станції сільськогосподарського призначення з метою збільшення продуктивності. (Дипломна робота. Умань, Уманський національний університет, 2025: пояснювальна записка на 46 сторінках, у т.ч. 5 розділів, 9 рисунків, 2 таблиці, 15 джерел).

Об'єкт дослідження – процес контролю потужності в насосних установках.

Мета роботи – покращення енергоефективності електричного приводу насосної станції в системі водопостачання, завдяки впровадженню автоматизованої системи управління електричними приводами.

У роботі були розроблені математичні моделі для статичних режимів роботи електроприводу та побудовані механічні характеристики для векторного керування асинхронним електродвигуном. Для вивчення перехідних процесів моменту у функції часу при запуску та навантаженні були використані пакети програмування MATLAB.

Крім того, було проведено моделювання системи керування насосною установкою з використанням програми SIMULINK, яка входить до складу пакету прикладного програмного забезпечення MATLAB 7.1.

Дослідження показало, що використання системи керування, яка реагує на сигнали від датчика тиску, призводить до економії витрат на електроенергію. Оцінка цієї економії становить 23695 гривень на рік для насосної установки номінальною потужністю 2,2 кВт.

НАСОСНИЙ КОМПЛЕКС, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	6
1.1. Поточна ситуація з енергозбереженням у сільському секторі	6
1.2. Критерії для насосного комплексу	11
1.3. Оцінка використання електроенергії та можливостей зменшення енергетичних витрат в аграрному секторі	16
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В РЕЖИМІ ДИНАМІЧНОЇ РОБОТИ	19
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ЧЕРЕЗ МОДЕЛЮВАННЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ	27
3.1. Створення структурної схеми управління насосною станцією	27
3.2. Визначення характеристик об'єкта управління для насосної станції ..	30
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	36
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	40
ВИСНОВКИ.....	44
Список використаних джерел.....	45

ВСТУП

Водопостачання становить одну з найважливіших базових умов для функціонування та розвитку сільського господарства: від доступності й якості води залежить фізіологічний стан рослин, продуктивність тварин, формування врожаю та його якості. Надійні й своєчасні обсяги води визначають ефективність агровиробництва, фінансову стійкість господарств і загальну продовольчу безпеку на рівні громад і держав.

Сучасні виклики роблять управління водними ресурсами в агросекторі особливо актуальним. З одного боку, зростає конкуренція за воду між сільським господарством, промисловістю та побутом, з іншого — зміни клімату спричиняють нерегулярність опадів і частіші періоди посухи чи повеней. Непомірне використання води, застарілі системи зрошення й відсутність контролю призводять до виснаження підґрунтових вод, деградації ґрунтів, солонцювання та зниження родючості, що підриває довгострокову продуктивність земель.

Разом із тим, правильне водопостачання безпосередньо впливає на соціально-економічний розвиток регіонів: стабільні врожаї та здорові тваринницькі стада підвищують доходи фермерів, сприяють розвитку місцевих ринків і створенню робочих місць, а також зменшують вразливість громад перед кліматичними шоками та коливаннями цін на продовольчі товари.

Перспективним є детальний розгляд ключової ролі водопостачання в агровиробництві, основних екологічних та управлінських проблем, що виникають при його організації, а також перевірені практики і технології — від ефективних методів зрошення та накопичення дощової води до застосування датчиків вологості і супутникового моніторингу — які дозволяють забезпечити стале, раціональне та економічно виправдане використання водних ресурсів у сільському господарстві.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Поточна ситуація з енергозбереженням у сільському секторі.

Стан енергозбереження в сільському господарстві — важливий чинник підвищення стійкості сектору, скорочення витрат і зменшення викидів парникових газів. Нижче — стислий огляд поточної ситуації у світі й в Україні, основні тренди, застосовувані технології, виклики та напрямки розвитку.

Тренди у світі: зростає увага до енергоефективності в агросекторі в контексті кліматичної політики та зниження витрат. Розвиваються проєкти з декарбонізації, інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та цифровізації.

Технології і практики: енергоефективні системи зрошення (краплинне, автоматизоване), модернізація теплиць (термоізоляція, рекуперація тепла), високопродуктивні двигуни та приводи, використання сонячних панелей для живлення насосів і фермерської інфраструктури, біогазові установки на відходах тваринництва, теплові насоси, енергоефективні сортувальні й переробні лінії, агрономічні практики, що зменшують енергетичні витрати (точне землеробство, збереження вологи).

Політика та фінансування: багато країн вводять стимули (субсидії, кредити, податкові пільги) для енергоефективних інвестицій у селі; також зростає роль міжнародних програм фінансування кліматичних проєктів.

Результати: там, де проводиться модернізація й цифровізація, спостерігається помітне зниження питомого енергоспоживання й витрат, зростання продуктивності та зниження викидів CO₂. Однак прогрес нерівномірний — високі ставки в країнах з великими інвестиціями й технологічною інфраструктурою, повільніший розвиток у низькодохідних регіонах.

Ситуація в Україні.

Загальна картина після 2014 року і особливо після повномасштабного вторгнення 2022 року тема енергобезпеки й енергоефективності в агросекторі набрала додаткової ваги. Українське сільське господарство є енергоємним (зрошення, обробка, зберігання й переробка), водночас має великий потенціал для енергоефективних заходів і ВДЕ.

Заходи й практики: зростає впровадження сонячних електростанцій на фермах (для живлення насосів, освітлення, холодильних камер), інвестиції в модернізацію зерносховищ і сушарок, поступове впровадження точного

землеробства (GPS, датчики вологості й добрив), біогазові проєкти на великих тваринницьких комплексах. Часткові програми підтримки від держави і міжнародних донорів сприяють проєктам енергоефективності.

Виклики: обмежений доступ до капіталу для малих і середніх господарств, нестача масштабних програм підтримки, зношена інфраструктура (насоси, агрегати), енергетична уразливість під час бойових дій і руйнування логістики, кадрові та технічні бар'єри щодо впровадження сучасних рішень. Також є питання регуляторики, стандартизації й стимулів для ВДЕ в селі.

Переваги та потенціал: велика площа орних земель, сприятливі кліматичні умови для сонячної енергії, наявність аграрної сировини для біоенергетики, високий інтерес бізнесу до підвищення ефективності для зниження витрат у періоди енергетичної нестабільності.

Ключові бар'єри для обох рівнів

Фінансові: висока початкова вартість модернізації; недостатні кредитні та грантові інструменти для дрібних господарств.

Технічні: недоступність спеціалізованих рішень, брак сервісу й підтримки, низька технічна грамотність.

Інституційні: фрагментована політика, відсутність цілеспрямованих програм розвитку енергоефективності саме для сільськогосподарського сектора.

Ризики та невизначеність: коливання цін на енергоносії, геополітичні фактори, кліматичні шоки.

Рекомендовані напрями розвитку

Масштабне просування ВДЕ на фермах (сонячні панелі, біомаса/біогаз).

Стимулювання енергоефективних інвестицій через спеціальні кредитні лінії, гранти та податкові пільги.

Підтримка модернізації обладнання (насоси, мотори, сушарки) і впровадження систем автоматизації й точного землеробства.

Розвиток навчальних програм і сервісної інфраструктури для малих і середніх господарств.

Інтеграція енергетичної політики з сільськогосподарською та кліматичною політикою на національному рівні.

Енергозбереження в сільському господарстві розвивається глобально: активні технологічні та політичні ініціативи дають позитивні результати, але прогрес неоднорідний. В Україні є значний потенціал для економії енергії та переходу на ВДЕ, проте для реалізації цього потенціалу потрібні цілеспрямовані інвестиції, підтримка держави й покращення доступу до фінансування та знань.

Порівняльний аналіз використання енергії в сільському господарстві України та країн Західної Європи за ключовими параметрами: енергоємність, структура енергоспоживання, технології, політика, фінансування, інфраструктура, основні бар'єри та перспективи.

Енергоємність і продуктивність

Україна: загалом високий абсолютний рівень енергоспоживання на деяких операціях (особливо зерносушіння, зрошення в окремих регіонах, переробка), але нижча енергоефективність через застаріле обладнання і технології. Питомі енерговитрати на гектар та на тонну продукції часто вищі в традиційних господарствах.

Західна Європа: нижча питома енергоємність завдяки інтенсивній модернізації, автоматизації та широкому впровадженню енергоефективних рішень; вищі показники продуктивності (урожайність/га, продуктивність тварин).

Структура енергоспоживання

Україна: переважання викопних енергоносіїв (дизель, газ, електроенергія) для техніки, сушарок, опалення й насосів; зростає роль сонячної енергії на фермах, але поки що фрагментарно.

Західна Європа: значна частка енергії з відновлюваних джерел (сонце, вітер, біомаса, біогаз) і глибша інтеграція ВДЕ в агрооперації; електрифікація транспорту й обладнання швидше поширюється.

Технологічне оснащення

Україна: велика частина парку сільгосптехніки й обладнання — старіша, менше автоматизації; поширення точного землеробства й сенсорики зростає, але переважно в великих агрохолдингах.

Західна Європа: широка присутність систем точного землеробства, автоматизації парників, енергоефективних сушарок, теплових насосів, інтегрованих енергетичних рішень (PV + акумуляція + біогаз).

Політика і регулювання

Україна: політика енергоефективності в агросекторі менш системна; є програми підтримки та міжнародні проєкти, але відсутній послідовний масштабний державний пакет стимулів саме для агросектору.

Західна Європа: детально прописані національні та ЄС-політики (енергетична та кліматична), цільові програми субсидій, «зелені» кредити, тарифи та стимули на ВДЕ; вимоги до енергоаудитів та стандартів більші.

Фінансування й інвестиції

Україна: обмежений доступ до довгострокового дешевшого фінансування для малих і середніх господарств; інвестиції приходять переважно від великих агрокомпаній та міжнародних донорів.

Західна Європа: ширший доступ до грантів, пільгових кредитів, лізингу; більша участь приватних інвесторів у проектах енергоефективності та ВДЕ на фермах.

Інфраструктура й сервісне забезпечення

Україна: сервісні мережі для сучасного обладнання ще формуються; дефіцит локальних постачальників комплексних рішень у багатьох регіонах.

Західна Європа: розвинена сервісна інфраструктура, стандарти обслуговування, масове розповсюдження сервісних контрактів і консалтингу з енергоефективності.

Бар'єри

Україна: фінансові — капіталовкладення й кредитування; технічні — старе обладнання, брак кваліфікації; регуляторні — відсутність комплексних програм; ризики — енергетична та безпекова нестабільність.

Західна Європа: менш критичні, але існують бар'єри масштабування (регуляторні складнощі, інтеграція локальних ВДЕ у мережі, ринкові ризики), а також питання прийняття технологій дрібними фермерами.

Переваги та можливості

Україна: значний потенціал для розгортання сонячної енергії (вільні землі, сонячний ресурс), біоенергетики (відходи сільського господарства), економічний стимул модернізації після енергетичних шоків.

Західна Європа: передовий досвід, стандарти, фінансові інструменти й технології, які можна адаптувати і масштабувати; високий рівень професійної підтримки фермерів.

Рекомендації для України на основі західноєвропейського досвіду

Розробити цілеспрямовані державні програми кредитування і субсидування енергоефективних інвестицій у селі.

Підтримати масштабну електрифікацію і інтеграцію PV + акумуляція + біогаз у господарствах.

Створити мережі сервісного супроводу і навчальні центри з впровадження нових технологій.

Впроваджувати стандарти енергоаудиту та систему моніторингу енергоспоживання.

Стимулювати малі й середні господарства через комбіновані фінансові інструменти (гранти + доступні кредити).

Західна Європа демонструє вищу енергоефективність у сільському господарстві завдяки модернізації, інвестиціям у ВДЕ, потужним політичним стимулам і розвиненому сервісу. Україна має значний потенціал для зниження питомих енерговитрат і переходу на ВДЕ, але цьому заважають фінансові, технічні та інституційні бар'єри. Поєднання державної політики, доступного

фінансування, навчання та розвитку місцевого сервісу прискорить трансформацію українського агросектору за зразком Західної Європи.

Використання електрообладнання в тваринницьких приміщеннях і теплицях підвищує продуктивність та автоматизацію агровиробництва, але супроводжується низкою технічних, експлуатаційних і безпекових проблем. У огляді систематизовано основні виклики, їхній вплив на виробничі процеси та практичні підходи до мінімізації ризиків.

Електрифікація коригує мікроклімат, освітлення, автоматичне годування, доїння та системи зрошення, водночас підвищуючи залежність від надійності електропостачання, якості інсталяцій та сервісного обслуговування. Особливості тваринницьких приміщень і теплиць (висока вологість, агресивні гази, пил, органічні відкладення) створюють додаткові експлуатаційні навантаження на електрообладнання.

Коливання напруги, відключення мережі та нерівномірне навантаження призводять до виходу з ладу контролерів, приводів та приладів захисту; це викликає простої, стрес у тварин і втрати врожаю в теплицях.

Постійна вологість, розпилення добрив, аміачні випари й пил сприяють руйнуванню контактів, роз'ємів і датчиків, викликають замикання й неточності вимірювань.

Неналежні заземлення, відсутність захисних пристроїв і відкриті проводки підвищують ризик ураження струмом та пожежі; наявність людей і тварин посилює потребу в надійних заходах захисту.

Несправні або некалібровані датчики, відсутність стандартів інтерфейсів і складність інтеграції приводять до помилкових команд клімат-контролю (перегрів/переохолодження, зайве зволоження), що впливає на продуктивність.

Високі споживання обігріву, вентиляції й освітлення; недостатні резервні джерела напруги (генератори, батареї) ускладнюють безперебійну роботу під час аварій.

Обмежена місцева сервісна підтримка, віддаленість фахівців і дефіцит персоналу, що вміє обслуговувати електронні та програмні системи, подовжують час відновлення після поломок.

Неналежно захищене обладнання накопичує органічні відкладення і пил, що може сприяти поширенню інфекцій та шкідників.

Високі початкові витрати на якісні рішення, герметизацію, резервування і сервісні контракти роблять інвестиції складними для малих господарств.

Заходи мінімізації ризиків (рекомендації)

Покращення електропостачання: стабілізатори, якісні автомати й захист від перенапруг, планування навантажень.

Герметизація та захист обладнання: корпуси ІР-класа, антикорозійні матеріали, захищені роз'єми.

Ретельне проектування заземлення та систем захисту (RCD, диференційні автомати).

Стандартизація та тестування датчиків; регулярна калібровка систем автоматизації.

Резервні джерела: генератори, акумуляторні буфери, гібридні PV-рішення для критичних систем.

Розвиток сервісної мережі та навчання персоналу: створення локальних центрів обслуговування, навчальні програми з експлуатації та ремонту.

Санітарні практики: регулярне очищення обладнання, використання матеріалів, що перешкоджають накопиченню біоматеріалу.

Оцінка економіки: поєднання грантових/кредитних механізмів та поступових модернізацій із пріоритезацією критичних систем.

Проблеми застосування електрообладнання в тваринницьких приміщеннях і теплицях є комплексними і потребують системного підходу: технічного (проектування й захист), організаційного (обслуговування й навчання) та фінансового (оцінка рентабельності й підтримка інвестицій). Лише інтегрування цих заходів забезпечить надійну, безпечну та ефективну експлуатацію електросистем у агровиробництві.

1.2. Критерії для насосного комплексу

Детальний перелік критеріїв, які слід враховувати при проектуванні, виборі та експлуатації насосного комплексу для водопостачання тваринницької ферми.

Продуктивність (рух/показник подачі)

Розрахунок дебіту (м³/год або л/хв) базується на: кількості тварин, нормі водоспоживання на голову, розподілі по годині/дню (пікові навантаження), додаткових споживачах (мийка, охолодження, приготування кормів).

Передбачати запас 10–30% на майбутнє розширення й резерви.

Напір (загальний напір / сумарний напір системи)

Враховувати статичний напір (різницю висот), втрати на тертя у трубопроводі (довжина, діаметри, арматура), надлишковий тиск для запорної арматури та можливих підйомів.

Визначити мінімальний і максимальний робочий напір для вибору робочої точки насоса.

Вибір типу насоса

Відцентрові (горизонтальні/вертикальні) — для більшості господарств (стабільна подача, простота обслуговування).

Поршневі/плунжерні — для високого тиску при невеликій подачі.

Самовсмоктувальні — якщо потрібен підйом із неглибоких джерел без примусового підводження води.

Погружні (занурювальні) — для свердловин і колодязів; враховувати вимоги до охолодження двигуна.

NPSH (Net Positive Suction Head) та самовсмоктування

Перевірити доступний NPSH системи й порівняти з вимогою насоса (NPSHrequired) — запобігає кавітації.

Для поверхневих насосів забезпечити мінімальні втрати на всмоктуванні; при великій висоті всмоктування застосовувати ежектори або підвищувальну систему.

Матеріали і стійкість до корозії/забруднень

Матеріали корпусу та робочих коліс — чавун, нержавіюча сталь (AISI 304/316), бронза — в залежності від агресивності води (мінералізація, сірководень, хлориди).

Для вод із твердими домішками — насоси з великою пропускною здатністю/безперешкодні робочі колеса (торцеве ущільнення відповідного типу).

Фільтрація і передочищення

Сіткові фільтри, піскотруби, відстійники або сепаратори перед насосом для захисту від механічних забруднень.

Регламент очищення фільтрів відповідно до мутності води.

Енергетична ефективність та економіка

Вибирати насос із максимальною ефективністю у робочій точці (стандартна зона — 70–90% від $Q_{\max}$ для центробіжних).

Оцінити електропривод (IE3/IE4) та можливість регулювання частоти через частотний перетворювач (ЧП) для оптимізації витрат.

Розрахувати експлуатаційні витрати (енергія, техобслуговування) у життєвому циклі (LCC).

Джерело живлення і резервування

Тип живлення: мережеве (230/400 V), дизель-генератор як резерв, сонячні PV + інвертор для автономних систем.

Забезпечити резервний насос (N+1) або резервну лінію для критичних споживачів; для великих комплексів — дублювання з автоматичним перемиканням.

Система управління та автоматика

PLC/контролер із логікою включення/виключення, захистом від сухого ходу, контролем тиску/витрати, рівня в баках.

Використання частотних перетворювачів для плавного регулювання дебіту й зниження гідроударів.

Віддалений моніторинг (SCADA, GSM/LoRa/4G) для швидкого реагування на аварії.

Захисти й безпека

Термозахист двигуна, захист від перевантаження, датчики температури підшипників.

Захист від сухого ходу (датчики рівня, протоки).

Електробезпека: правильне заземлення, УЗО/RCD, автоматичні вимикачі, відповідні кабелі та щити з IP-класом.

Гідравлічна стабільність і запобігання гідроударам

Використання демпферів тиску/мембранних баків, байпасних ліній, плавного запуску (ЧП або вогнулодинамічні стартери).

Правильне розміщення зворотних клапанів (антиудари) та запірної арматури.

Експлуатаційні умови і клімат

Врахувати температуру довкілля, присутність вологи/пилу, можливі замерзання — ізоляція, підігрів, утеплення.

Для відкритих майданчиків — захист клемної коробки та двигуна від вологи і птахів.

Технічне обслуговування і сервіс

Прості доступні конструкції для швидкої заміни ущільнень, підшипників і робочих коліс.

Документація, запасні частини, сервісні контракти, навчання персоналу.

Регламент ТО: інтервали, контроль вібрації, огляд ущільнень, перевірка електрики.

Монтажні і гідравлічні умови

Мінімальні відстані до стін для обслуговування, правильна опора та антивібраційні прокладки.

Оптимальні діаметри всмоктувальної та напірної ліній для мінімізації втрат.

Вертикальне/горизонтальне розташування згідно з технічними обмеженнями виробника.

Сертифікації, стандарти та нормативи

Відповідність стандартам (ISO, EN, місцеві електробудівельні норми), вимогам санітарії й пожежної безпеки.

При необхідності — харчова безпека (матеріали, контактують з водою споживчого призначення).

Екологічні та шумові параметри

Викиди шуму (дБ) — важливі для розташування біля тваринницьких приміщень.

Оцінка витрат палива (при дизельних резервних установках) і екологічних ризиків розливів.

Економічна оцінка та життєвий цикл

CAPEX vs OPEX: аналіз окупності інвестицій у більш ефективне обладнання.

Розрахунок LCC: енергія, обслуговування, заміна частин, втрати через простої.

Інтеграція з інфраструктурою ферми

Сполучення з резервними баками, ємностями, автоматичі по годиннику годування/поливу.

План реагування на збої: сценарії перемикавання, інструкції для персоналу.

Масштабованість і модульність

Модульний склад (кілька насосних блоків) дозволяє нарощувати потужність та полегшує сервіс.

Легкість додавання сонячних або дизельних модулів у майбутньому.

Документація та навчання персоналу

Наявність експлуатаційних інструкцій, схем електричних підключень, журналів обслуговування.

Навчання операторів: базове усвідомлення ознак кавітації, витоків, помилок PLC та процедур аварійного відключення.

Для тваринницької ферми насосний комплекс має бути розрахований на реальні пікові навантаження, забезпечувати достатній напір і дебіт з запасом, бути стійким до умов середовища (вологість, корозія, забруднення), енергоефективним, мати надійну автоматику, резервування й простоту обслуговування. Інвестиція в якісний підбір матеріалів, систему фільтрації, автоматику з моніторингом та планове ТО зменшують ризики простоїв, підвищують довговічність обладнання й загальну рентабельність водопостачання.

Керований електропривід (частотний перетворювач, ЧП/VFD) для водяного насоса дає низку значних економічних переваг, що роблять його доцільною інвестицією для систем водопостачання.

Енергозбереження. Регулювання частоти й швидкості двигуна під фактичну потребу дозволяє знизити споживану потужність значно більше, ніж пропорційно зміні продуктивності (для відцентрових насосів потужність

пропорційна кубу швидкості). На практиці економія електроенергії часто складає 20–50% порівняно з нерегульованими приводами із запірною арматурою.

Зниження експлуатаційних витрат (OPEX). Менше споживання електроенергії + м'якший запуск/зупинка зменшують механічний та електричний знос (підшипники, муфти, арматура), що знижує витрати на ремонт і заміну компонентів.

Подовження строку служби обладнання. Плавний запуск без гідравлічних ударів і пускових струмів зменшує навантаження на насосно-моторний агрегат і трубопровід, що підвищує надійність і термін служби насосів, електродвигунів і арматури.

Зменшення пускових струмів і потреби в потужності. ЧП обмежує пусковий струм, що знижує навантаження на електромережу, дозволяє уникнути додаткових витрат на підсилення ліній або генераторів та зменшує ризик спрацювання захисту при одночасних пусках.

Оптимізація режимів і зниження втрат у трубопроводі. Регулювання дебіту за реальним попитом виключає штучне звуження в трубопроводі (зворотні клапани, дроселювання), що зменшує гідравлічні втрати і енергетичні витрати.

Зниження пикових навантажень і тарифів. Плавне управління дозволяє згладити піки споживання, що може зменшити оплату за потужність у тарифах з компонентом потужності або уникнути штрафів за перевищення домовленої потужності.

Підвищення продуктивності й якості процесу. Точне підтримання тиску/витрати підвищує ефективність систем поливу, технологічних процесів і водопостачання, зменшує втрати води й пов'язані збитки (наприклад, у системах зрошення або охолодження).

Менші капіталовкладення в інфраструктуру резервування. Завдяки гнучкому керуванню та зниженню потреби в потужності іноді можна уникнути дорогих апгрейдів трансформаторів чи ліній, а також зменшити кількість й потужність резервних генераторів.

Швидка окупність інвестицій. Завдяки значним енергозбереженням і зниженню витрат на обслуговування, період окупності ЧП для насосних установок зазвичай становить від 1 до 3 років залежно від режиму роботи, тарифів на електроенергію та вартості обладнання.

Додаткові вигоди від автоматизації та моніторингу. Інтеграція ЧП у систему управління дозволяє отримувати дані про стан насоса, діагностику, віддалений контроль і прогнозне обслуговування — це ще додаткова економія за рахунок зниження простоїв і планування ТО.

Висновок: встановлення керованого електроприводу для водяного насоса — економічно обґрунтована міра, що забезпечує значне зниження витрат на електроенергію та обслуговування, підвищує надійність обладнання й дає швидко окупність інвестицій, особливо в системах із змінним навантаженням.

1.3. Оцінка використання електроенергії та можливостей зменшення енергетичних витрат в аграрному секторі.

Дослідження та сучасні огляди показують, що електроприводи залишаються ключовим елементом енергоспоживання в сільському господарстві. За сучасними оцінками, частка електроприводів у загальному споживанні електроенергії агросектору може досягати близько 50–65 %, при цьому значна доля (понад 50 %) припадає на живлення асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором. Насоси, вентилятори та компресори — головні споживачі енергії в технологіях, що формують мікроклімат приміщень і забезпечують водопостачання та вентиляцію, і вони найчастіше працюють на асинхронних двигунах.

Економічний вплив експлуатації електродвигунів значний: витрати на електроенергію за весь період експлуатації часто в декілька разів перевищують первісну вартість самого двигуна (за оцінками європейських експертів — від 3 до 6 разів залежно від режиму роботи). Наразі регульовані електроприводи (VFD/ЧП) технічно доцільні для приблизно 50–75 % технологічного обладнання із змінним навантаженням, але фактичний рівень їх впровадження в агросекторі залишається низьким (оціночні значення — на рівні 7–15 %), що свідчить про значний резерв енергозбереження.

Типи перетворювачів частоти та архітектури

Одноступеневі перетворювачі (пряме формування змінної трьохфазної напруги з мережі) мають обмежене застосування через складність силових схем, чутливість до якості мережі й обмежений діапазон роботи.

Двоступеневі схеми (випрямляч — проміжна постійна ланка — інвертор) стали стандартом: випрямлення мережевої напруги з формуванням DC-шини та інвертор на ключах для генерації керованої трьохфазної напруги. Така архітектура допускає використання фільтрів і реакторів для зниження гармонік і підвищення якості живлення, хоча пов'язана з втратами на перетворення.

Сучасні приводи базуються на IGBT-інверторах (або SiC/MOSFET у високочастотних рішеннях) з PWM-модуляцією для формування синусоїдальної основної гармоніки та мінімізації спотворень.

Типи інверторів управління

Інвертори струму (з керованим випрямлячем) використовуються в специфічних задачах регулювання струму.

Інвертори напруги зі входом з випрямлячем та DC-фільтром (найпоширеніші) забезпечують гнучке управління напругою і частотою.

Сучасні приводи оснащені цифровим контролером (DSP/микроконтролер), що реалізує алгоритми векторного/адаптивного управління, захисти й діагностику.

Управління навантаженням і енергоефективність

Поведінка типових приводів для насосів і вентиляторів підпорядковується законам гідродинаміки: момент опору $\sim n^2$, потужність $\sim n^3$. Тому зниження швидкості приводного вала дає експоненційну економію енергії — практична економія при застосуванні VFD у реальних системах часто становить 20–50 %, залежно від початкового способу регулювання (дроселювання, байпас тощо) і профілю навантаження.

Запровадження векторного керування (field-oriented control, FOC) дає найкращі техніко-економічні показники для насосів і вентиляторів: точне регулювання моменту/швидкості, покращена динаміка, зниження втрат та вищий ККД у широкому діапазоні швидкостей.

Крім прямих енергозбережень, VFD зменшують пускові струми, знижують механічні та гідравлічні удари, продовжують ресурс насосно-моторних агрегатів і скорочують витрати на технічне обслуговування.

Додаткові вигоди від інтеграції перетворювачів

Оптимізація технологічних процесів: підтримка стабільного тиску/витрати, програмна логіка для пікових режимів, зниження витрат води (делікатне управління подачею) — типові зниження витрат води 20–30 % при переході від простого дозування до регульованих режимів.

Діагностика й моніторинг: сучасні приводи надають телеметрію, параметри стану двигуна й насоса (струм, вібрація, температура), що дозволяє впроваджувати предиктивне обслуговування.

Зниження тарифних витрат: згладжування пікових навантажень і уникнення короточасних перевантажень можуть зменшити платежі за потужність у тарифних зонах з компонентом потужності.

Особливості застосування в агросекторі

Типові потужності асинхронних двигунів у сільському господарстві — від близько 0,5 до 30 кВт; приводи повинні бути пристосовані до важких умов експлуатації (сезонні піки, добова нерівномірність навантаження, запилені й вологі середовища).

Часто номінування та вибір двигунів здійснюються за максимальним навантаженням, тому реальна середня завантаженість становить 40–70 % від номіналу — ще один аргумент на користь регулювання частоти.

Інвестиції в VFD для систем водопостачання та вентиляції часто мають відносно короткий період окупності (1–3 роки) залежно від режиму роботи, тарифів на електроенергію та початкових методів регулювання.

Практичні висновки

Впровадження частотно-регульованих приводів із векторним керуванням у насосних і вентиляторних системах агропідприємств є одним із найбільш ефективних напрямів енергозбереження.

Очікувані ефекти: значне зниження електроспоживання (до 20–50 % у типових системах), скорочення втрат води (порядку 20–30 % у випадках оптимізованого управління подачею), зниження витрат на технічне обслуговування і продовження ресурсу обладнання.

Для досягнення максимального ефекту необхідне комплексне рішення: грамотний підбір приводу під робочу точку, фільтрація і захист від гармонік, коректне налаштування алгоритмів управління, інтеграція до систем автоматизації та моніторингу, й організація сервісного обслуговування.

Таким чином, сучасні частотно-регульовані електроприводи на основі IGBT/SiC-технологій і векторного управління є технічно і економічно виправданим рішенням для широкого спектра застосувань у сільському господарстві, зокрема для насосних систем водопостачання та вентиляції, де вони забезпечують значні енергетичні, технологічні та експлуатаційні переваги.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В РЕЖИМІ ДИНАМІЧНОЇ РОБОТИ

Система перетворювача частоти — асинхронний електропривід є складною технічною системою; її дослідження в науковому експерименті найбільш ефективно здійснювати з допомогою математичного моделювання. У огляді узагальнено сучасні підходи до моделювання, методи динамічного аналізу електромагнітних процесів, архітектури векторного керування та функціональні блоки системи, а також підкреслено практичне значення цих інструментів для підвищення ефективності й надійності приводів.

Роль математичного моделювання

Математичні моделі дозволяють відтворювати миттєві значення струмів і напруг у всіх ділянках приводу, аналізувати номінальні, перехідні та аварійні режими, проводити гармонічний і енергетичний аналіз.

Сучасні моделі базуються на системі диференціальних рівнянь електромагнітних процесів статора й ротора, враховують нелінійності, втрати, насичення, температурні ефекти та вплив мережі живлення.

Моделювання дає змогу досліджувати вплив параметрів перетворювача (фільтрів, реакторів, характеристики ключів) і алгоритмів управління на стабільність, динаміку та енергоефективність системи без дорогих експериментів.

Динамічний аналіз електромагнітних процесів

Дослідження трансієнтів, кавітації гармонік і взаємодії між перетворювачем та двигуном є критичними для запобігання перевантаженням, перегрівам та некоректній роботі системи.

Методи аналізу включають часове моделювання за допомогою чисельних інтеграторів, гармонічний баланс, частотний аналіз та мультифізичні симуляції (електромагнетизм + теплообмін + механіка).

Архітектура перетворювача частоти для асинхронного приводу

Сучасний стандарт — двоступенева архітектура з проміжною DC-шиною: випрямляч (нерегульований або керований) → фільтр/реактор DC → інвертор на силових ключах (IGBT/SiC/MOSFET) з PWM/Space-Vector модуляцією.

Такі рішення забезпечують гнучкість, можливість згладжування гармонік, рекуперацію енергії та високу ефективність перетворення.

У складніших реалізаціях використовують активні випрямлячі для корекції коефіцієнта потужності та двонапрявлену передачу енергії.

Сучасні схеми керування: векторне керування

Векторне (field-oriented) керування дозволяє розділяти складові потоку та моменту, забезпечуючи незалежне регулювання струму потоку й струму моменту.

Застосовуються як пряме векторне керування з виміряними параметрами, так і бездатчикові (sensorless) алгоритми з оцінкою положення/потoku спостерігачами.

Векторне керування підвищує динаміку, точність регулювання швидкості/моменту та енергоефективність у широкому діапазоні частот.

Функціональна структура системи (ключові блоки)

Регулятори: П-регулятор потоку (РП) і ПІ-регулятор швидкості (РС) забезпечують базову ієрархію керування: регулювання потоку (магнітного стану) і регулювання швидкості/моменту.

Перетворювачі координат (ПК1, ПК2): перехід між трьохфазною обертовою системою та полярною (r , ϕ) для виділення амплітудно-фазових характеристик вектора керування та зворотного перетворення для формування фазних сигналів.

Ланка обмеження амплітуди (ОБМ): захищає від перевищення допустимих величин вектора керування, зберігає стійкість і запобігає насиченню.

Трифазний релейний/інверторний модуль струмів (РРТ): безпосередньо керує силовими ключами інвертора для формування необхідних фазних струмів.

Перетворювач частоти (ПЧ): включає випрямляч, DC-фільтр (ємність/індуктивність) і трифазний інвертор; сучасні ПЧ мають вбудовані фільтри гармонік та засоби захисту.

Спостерігач (СП): оцінює напрямні косинуси, кути та координати вектора вихідних змінних для орієнтації поля й реалізації бездатчикових алгоритмів.

Алгоритми та реалізація управління

Управління реалізується на цифрових платформах (DSP, ARM-MCU, FPGA) із реалізацією FOC, SVPWM, адаптивних і робастних регуляторів.

Додаткові модулі: обмеження струму/напруги, антиблокувальні алгоритми, захист по температурі/вібрації, діагностика та віддалений моніторинг.

Для підвищення стійкості використовують комбіновані підходи: feedforward для компенсації швидких змін та feedback-контролери для стабілізації в довгостроковій перспективі.

Практичне значення та переваги моделювання

Моделі дозволяють оптимізувати параметри регуляторів, підібрати компоненти DC-шини, визначити вимоги до фільтрації та систем захисту, прогнозувати енергетичну ефективність.

Діагностика стану системи на основі моделі й телеметрії підвищує надійність і забезпечує прогнозне обслуговування.

Висновки

Підхід, що поєднує точні математичні моделі та сучасні цифрові алгоритми векторного керування, є базовим для досліджень і оптимізації асинхронних електроприводів із перетворювачем частоти.

Сучасні архітектури (DC-ланка + IGBT/SiC-інвертор) і методи (FOC, SVPWM, sensorless observers) забезпечують високу динаміку, ефективність і діапазон застосувань у промислових та аграрних установках.

Подальший розвиток спрямований на інтеграцію потужних засобів діагностики, енергооптимізації (рекуперація), використання SiC-технологій і впровадження машинного навчання для адаптивного налаштування керування та прогнозного обслуговування.

Цей огляд підсумовує сучасні підходи до моделювання та реалізації векторних систем керування асинхронними електроприводами і може слугувати основою для експериментальних досліджень, розробки алгоритмів та практичних впроваджень у технічно складних середовищах.

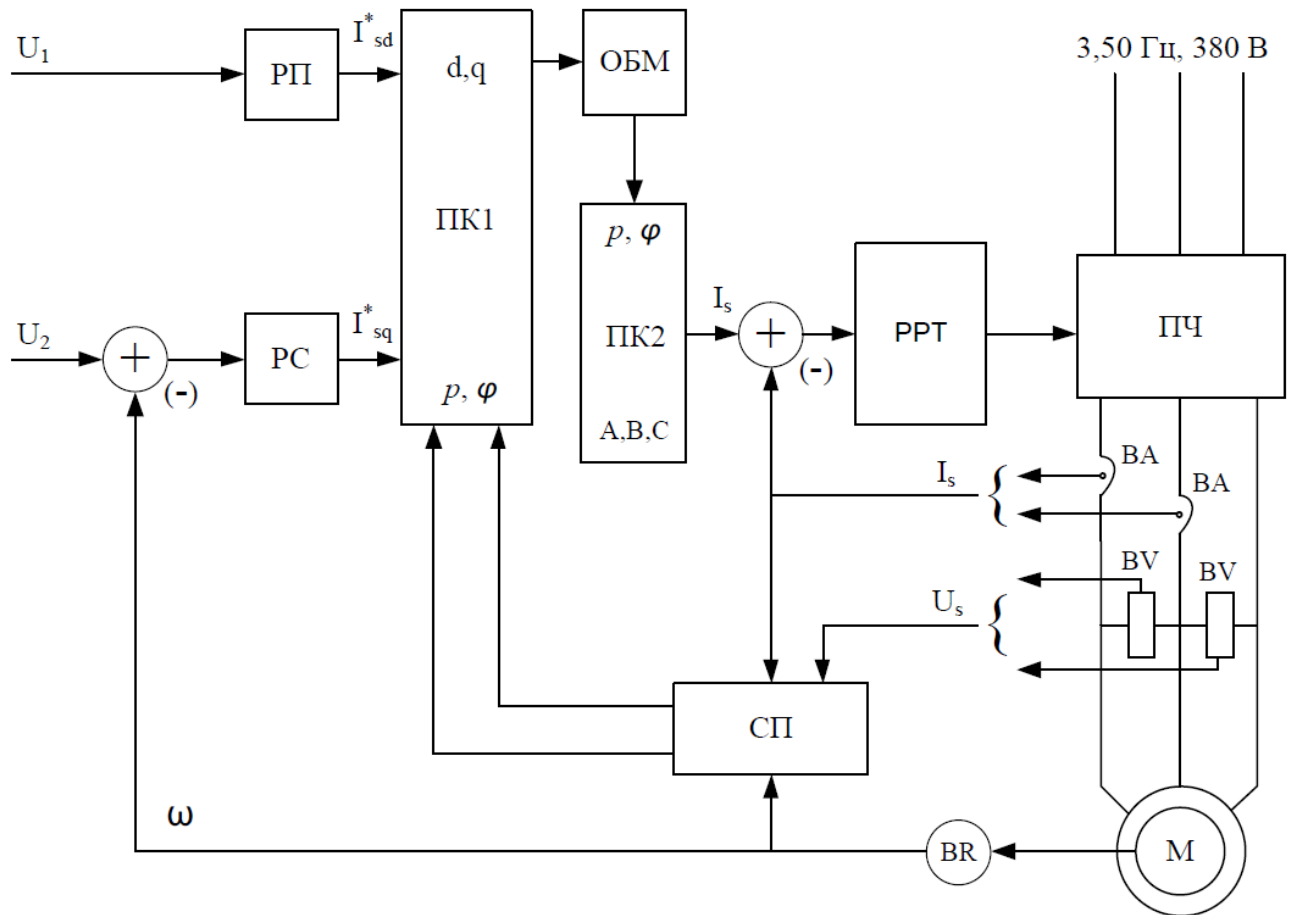


Рисунок 2.1. Блок-схема узагальненої системи автоматичного регулювання швидкості асинхронного двигуна.

Рекомендовано застосовувати сучасні середовища моделювання для створення комп'ютерної моделі системи автоматичного керування асинхронним двигуном. Сучасні інструменти (Simulink/Simscape у MATLAB, спеціалізовані бібліотеки та HIL-платформи) дозволяють будувати фізично обґрунтовані моделі, проводити динамічний аналіз, оптимізацію алгоритмів векторного керування і перевірку реалізації в режимах близьких до реальних.

Інструменти та платформи (сучасна альтернатива MATLAB 6.0)

MATLAB + Simulink + Simscape Electrical (раніше SimPowerSystems): комплексна платформа для моделювання силової електроніки, електромашин і систем управління; містить бібліотеки електродвигунів, ПЧ, датчиків, фільтрів і контролерів.

Control System Toolbox, DSP System Toolbox, Motor Control Blockset: готові алгоритми PID/FOC, SVPWM, спостерігачі й інструменти для аналізу стабільності.

HIL/RT платформи (dSPACE, OPAL-RT, Speedgoat): для тестування реальних контролерів під навантаженням моделі в реальному часі.

Відкриті альтернативи: Python (NumPy/SciPy, PyDy, Modelica-інтерфейси), OpenModelica, JModelica — для тих, хто віддає перевагу вільним інструментам.

Архітектура комп'ютерної моделі

Модель двигуна: магнітні рівняння статора/ротора у $d-q$ або просторово-сіткові моделі; врахування індуктивностей, опорів, втрат, насичення й температурних залежностей.

Модель перетворювача частоти: випрямляч (нерегульований/керований), DC-шина, інвертор на IGBT/SiC з моделлю PWM/SVPWM, паразитні індуктивності та фільтри.

Модель навантаження та механіки: момент навантаження, інерція, тертя, передатні механізми.

Алгоритм керування: двоканальна структура регулювання струмів у декартовій ($\alpha\beta/dq$) або полярній координаті; П-регулятор потоку та ПІ-регулятор швидкості; спостерігач для координат/поля (sensorless).

Модулі захисту та діагностики: обмеження струму/напруги, алгоритми захисту від перевантаження, моніторинг вібрації/температури.

Побудова двоканальної системи регулювання струмів

Двоканальна структура (канал d — потік, канал q — момент) реалізується як окремі регулятори струму (П або ПІ) у декартовій системі координат; забезпечує незалежне регулювання потокової та моментної складових.

Параметри регуляторів налаштовуються за методами стандартних лінійних форм, частотними методами (Bode), оптимізацією у часі (Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, або автоматичні оптимізатори).

Компенсація нелінійностей: feedforward-компоненти, інтеграція спостерігачів для корекції помилок вимірювань і затримок.

Налаштування зворотного зв'язку

Параметр $d1$ (коефіцієнт передачі по струму в каналі зворотного зв'язку) — підлягає систематичній ітеративній оптимізації: лінійне проектування для забезпечення желаємої смути пропускання і запасів стійкості; перевірка при варіаціях параметрів двигуна і джерела живлення.

Верифікація робочих точок: моделювання в номінальних, перехідних і аварійних режимах; чутливісний аналіз по зміні інерції, опору, втрат та помилок вимірювань.

Методи моделювання та аналізу

Імітаційні (time-domain) моделі для переходів, старту/зупинки, аварійних сценаріїв.

Частотний/гармонічний аналіз для оцінки впливу перетворювача (гармоніки, ЕМІ) та вимог до фільтрації.

Мультифізичні симуляції (електромагнітний + тепловий + механічний баланс) для оцінки нагріву, деградації та надійності.

Використання HIL для перевірки контролера та алгоритмів у реальному часі.

Практичні рекомендації при моделюванні

Використовувати фізично обґрунтовані параметри (експериментально або з паспортів) і проводити калібрування моделі.

Моделювати джерело живлення з реальними обмеженнями (внутрішні опори, провали напруги, гармоніки).

Інтегрувати алгоритми фільтрації сигналів і моделювати шум/затримки вимірювань.

Розробляти тестові сценарії: нормальні цикли, піки навантаження, короткі замикання, відключення фази, блокування ротора.

Документувати модель, версії компонентів і вихідні умови для реплікації результатів.

Верифікація та валідація

Порівняння результатів моделі з експериментальними вимірами: струм, напруга, крутний момент, швидкість, температура.

Чутливісний аналіз і оцінка невизначеності параметрів.

Тестування на апаратурі HIL і поступова інтеграція контролера у реальну систему.

Сучасні середовища моделювання (Simulink/Simscape + Motor Control Toolboxes, HIL-платформи) дозволяють будувати детальні, валідовані моделі векторного керування асинхронними приводами з двоканальною системою регулювання струмів. Правильна побудова моделей, налаштування зворотних зв'язків (параметри на кшталт d_1) і детальна валідація дають змогу оптимізувати алгоритми керування, підвищити надійність і енергоефективність системи перед впровадженням у виробництві.

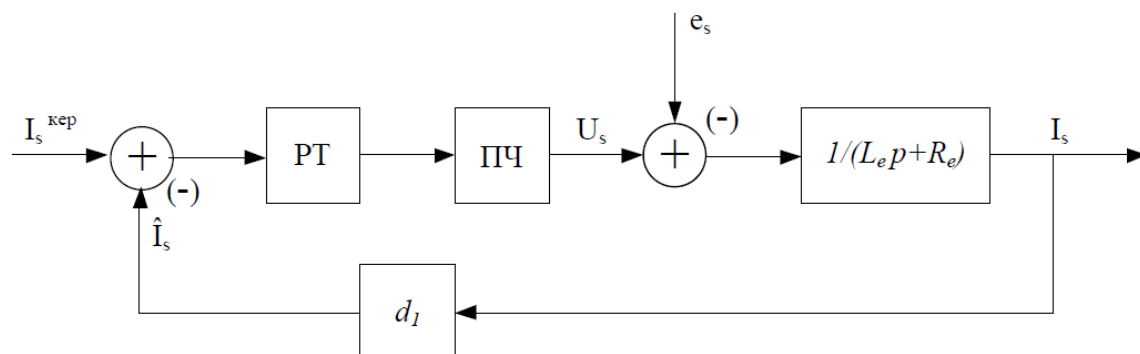


Рисунок 2.2. Схема, що відображає структуру системи керування струмами статора, представлена в декартовій системі координат.

У випадку двоканального замкнутого контуру автоматичного регулювання струмів постійні часу внутрішніх каналів вибираються із врахуванням умови частотного розділу між контурами: $\tau_{\text{current}} \ll \tau_{\text{outer}}$, що забезпечує швидку реакцію струмових контурів порівняно з зовнішніми векторними контурами. Такий вибір гарантує, що в робочому діапазоні частот внутрішні контури можуть розглядатися як практично миттєві (жорсткі) для зовнішнього контуру, що спрощує синтез регуляторів і дозволяє застосовувати модель з керованим джерелом струму без урахування додаткових інерційних ефектів джерела.

Постійні часу зовнішнього контуру регулювання вектора вихідних змінних визначаються з рівнянь рівноваги частотних характеристик (умови співвіднесення смуг пропускання) та забезпечують необхідний розподіл рухів у багатоконтурній системі. Практично це задається співвідношенням $\tau_{\text{outer}} \approx (3 \dots 10) \cdot \tau_{\text{current}}$, або еквівалентними умовами по зрізній частоті регуляторів, що забезпечують потрібні запаси стійкості й динаміки для векторного керування (FOC).

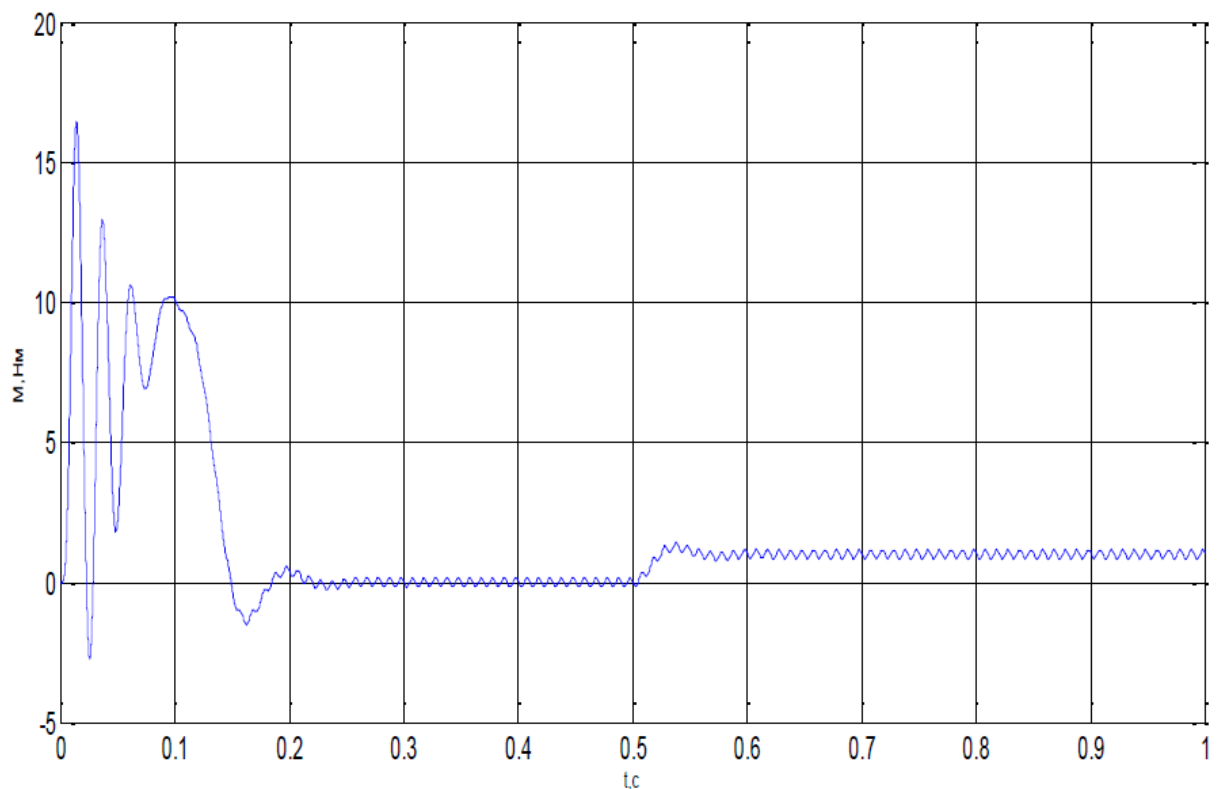


Рисунок 2.3. Динаміка моменту у часі при запуску без навантаження та при додаванні навантаження.

Такий підхід дозволяє використовувати математичну модель приводу з керованим джерелом струму, де внутрішні струмові контури імітуються жорсткими, що спрощує моделювання й аналіз переходів.

На рисунку 2.3 показані перехідні процеси крутного моменту: пуск приводу при прямому включенні на номінальну напругу та накидання/зняття навантажувального моменту. З графіків видно, що при прямому пуску початкові коливання моменту згасають за $\approx 0,25$ с, тоді як при різкому накиданні навантаження спостерігаються менш виражені коливання, що стабілізуються за $\approx 0,1$ с. Це узгоджується з обраними часовими константами: швидкі струмові контури гасять перехідні явища, а повільніші зовнішні контури формують тривалішу динаміку.

В експериментальній постановці до початку пуску всі змінні встановлено в нуль (нульові початкові умови). У момент $t = 0.1$ с відбулося різке збільшення номінального моменту, що спричинило другий перехідний процес. На цей час швидкість, струми і потокозв'язування вже досягли встановлених значень, тобто вони задавали ненульові початкові умови для наступного переходу. У моделюванні це також реалізовано автоматично; при необхідності їх можна отримати аналітично, виходячи з початкових значень напруги на статорі, кутової частоти цієї напруги та початкової частоти роторної ЕРС, яку визначають по механічних характеристиках двигуна.

Перевага описаного підходу — можливість спрощеного, але точного аналізу послідовних перехідних процесів у багатоконтурній системі векторного керування: відомі часові співвідношення і коректно задані початкові умови підвищують точність прогнозування динаміки, полегшують налаштування регуляторів і оптимізацію алгоритмів (наприклад, параметрів П/ІІ у струмових і векторних контурах).

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ЧЕРЕЗ МОДЕЛЮВАННЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

3.1. Створення структурної схеми управління насосною станцією.

Покроковий методичний план створення структурної схеми управління насосною станцією (проектна методика), з переліком блоків, вимог та рекомендацій для практичної реалізації.

Визначення завдань і вимог

Описати функції станції: водоподача, підтримка тиску, резервування, дренаж, пожежне водопостачання тощо. Визначити продуктивність, мін./макс. тиск, пікові навантаження, циклічність, режим роботи (постійний/періодичний). Перелік споживачів, критичні точки та вимоги по надійності (SLA, час відновлення). Нормативні та безпекові вимоги (IP, вибухозахист, електробезпека, санітарні норми).

Аналіз технологічного процесу і топологія гідросистеми

Скласти технологічну схему трубопроводів, резервуарів, фільтрів, клапанів, зворотних клапанів, байпасів. Визначити робочі точки: мін./ном./макс. дебіт і тиск, висота підйому. Визначити джерела води (свердловина/резервуар/мережа) і місця встановлення насосів.

Визначення функціональних блоків контролю

Наглядові регулятори: контроль тиску (пресостат/поплавок + VFD/дописні запуски), підтримка рівня у баках (датчики рівня), контроль витрати (витратоміри). Силові блоки: насосні агрегати (основні + резервні), пуско-запускові пристрої, контактори/вимикачі, перетворювачі частоти (VFD). Захисти: захист двигуна (термостат, струмовий захист), сухий хід, захист від перевантаження насоса, аварійне відключення (E-stop). Автоматика: PLC/контролер для логіки управління, блоки вводу/виводу (DI/DO, AI/AO), модулі зв'язку. АСКОВ/SCADA/HMI: операторська панель, історія подій, тенденції, віддалений моніторинг.

Вибір стратегії керування

Пріоритети запуску насосів: ротація (фазний/циклічний), рівень навантаження, чергування для вирівнювання ресурсу. Режими: автоматичний (PLC), ручний, захищений (без зв'язку/ручне), аварійний. Тип регулювання подачі: ступінчасте (пуски/зупинки), VFD-регулювання за тиском/витратою, комбіноване. Логіка резервування: N+1, 2×50% тощо; автоматичне перемикання при відмові.

Формування структурної схеми (блок-діаграма)

Розмістити блоки: джерело води → фільтр/секція підготовки → насосні агрегати (основні/резервні) із запірною арматурою → напірний колектор → споживачі/резервуар. Над кожним насосом — блоки: VFD (якщо є) → електродвигун → захист струму/температури → датчик тиску/витрати на напірній лінії. Включити датчики рівня в джерелах/резервуарах, датчики тиску в ключових точках, витратомір. Вказати PLC як центральний контролер, підключення I/O, зв'язок з HMI/SCADA, архівом і віддаленим доступом. Додати блоки енергопостачання: трансформатор, розподільний щит, джерело резервного живлення (ДГ/UPS), захист мережі.

Деталізація логіки управління в схемі

Сигнали запуск/стоп: рівень, тиск, команда оператора, помилка. Пріоритети чергування: алгоритм ротації (за часом/за числом включень). Алгоритми VFD: підтримка тиску за зондом, PID-регулятор, обмеження струму/частоти, плавний запуск. Сценарії захисту: сухий хід → негайне відключення + сигнал тривоги; перевантаження → демпфування або заміна насоса.

Вимоги до зв'язку і інтеграції

Вибрати протоколи: Modbus TCP/RTU, OPC UA, Profibus/Profinet — залежно від системи. Телеметрія: GSM/4G/LTE, Ethernet, LoRa (для віддалених об'єктів). Кібербезпека: автентифікація, VLAN, резервні канали, логування подій.

Резервування та надійність

Резервні насоси, дублювання ключових датчиків, резервний контролер (hot-standby), джерело живлення (UPS/генератор). Фізичний захист обладнання (охолодження, IP-корпуси, антивібраційна опора).

Схема пуско-налагодження та тестування

Розробити сценарії тестів: холодний/гарячий пуск, емуляція відмов датчиків, перевантаження, відключення живлення. Перевірити інтерлок-логіку, час реакції, коректність перемикавання резерву. Налаштування PID/VFD під навантаженнями, калібрування датчиків, валідація робочих точок.

Документація та стандарти

Поставити вміст: структурні схеми (електричні й функціональні), таблиці I/O, алгоритми PLC (флоучарти), налаштування VFD, інструкції для оператора, журнали обслуговування. Відповідність стандартам: електрообладнання, охорона праці, пожежна безпека, гігієна (якщо потрібно).

Впровадження та навчання персоналу

Пилотний запуск, кінцеві налаштування, розгортання SCADA. Інструктаж операторів, тренінг з аварійних сценаріїв, технічного обслуговування.

Експлуатація й технічне обслуговування

Режимні журнали, регулярна перевірка датчиків, планове ТО насосів і електромережі. Моніторинг КРІ: енерговитрати, час простою, число циклів пуск/стоп, відповідність тиску/витраті.

Короткий перелік рекомендованих елементів для включення в структурну схему

Насоси (основні/резервні), VFD, контактори; Датчики: тиск, рівень, витрата, струм, температура підшипників, вібрація; PLC з резервуванням (за потреби), HMI/SCADA, сервер архіву; Електроживлення: вводи, УЗО, захист, джерело резервного живлення; Клапани, зворотні клапани, байпаси, фільтри;

Системи сигналізації та дистанційного доступу.

Структурна схема формується послідовно — від функціональних вимог та гідротехнічної топології до конкретних блоків автоматики й захисту. Головні принципи — чітке розмежування функцій, достатнє резервування, забезпечення безпечної експлуатації та зручність експлуатаційного обслуговування. Якщо треба, можу підготувати приклад блок-схеми у вигляді текстового ASCII-малюнка або детальну схему I/O під конкретну кількість насосів.

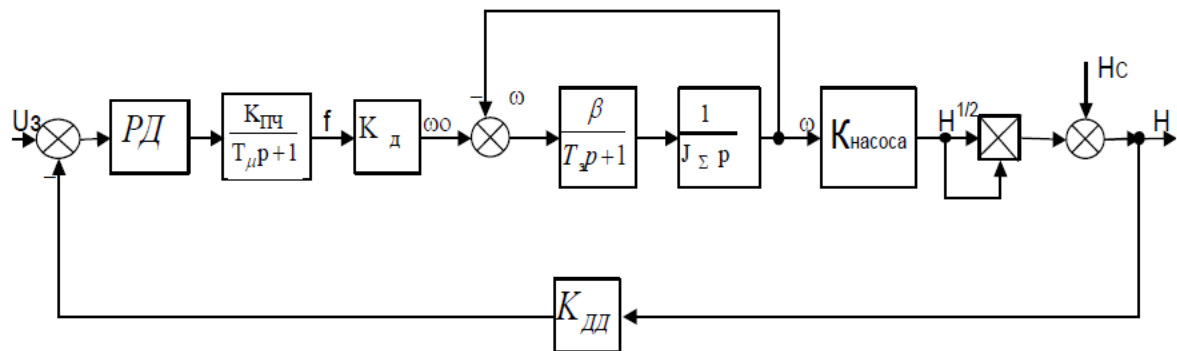


Рисунок 3.1. Схема внутрішнього пристрою електромеханічної системи управління.

На рис. 3.1 РД – регулятор тиску; КД – коефіцієнт передачі двигуна:

$$K_{\text{д}} = \frac{2\pi}{p}, \quad (3.1)$$

КДТ - коефіцієнт зворотного зв'язку по тиску:

$$K_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{с}}}{I_{\text{і}}} \quad (3.2)$$

3.2. Визначення характеристик об'єкта управління для насосної станції.

3.2.1. Експертний огляд характеристик об'єкту управління

Узагальнено, об'єкт управління може бути представлений за допомогою наступної функціональної схеми (див. рис. 3.2).

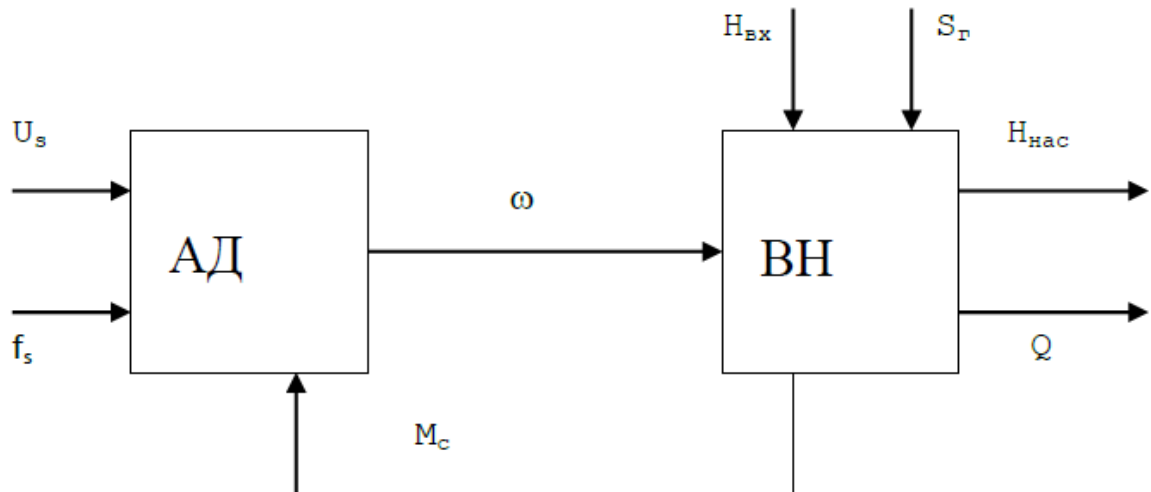


Рисунок 3.2. Об'єкт управління: АД – асинхронний двигун; ВН – відцентровий насос; U_s – напруга статора, В; f_s – частота напруги статора, Гц; ω – кутова швидкість обертання ротора і робочого колеса насоса, рад/с; M_c – статичний момент навантаження на валу двигуна, Нм; $H_{нас}$ – тиск на виході насоса, м; $H_{вх}$ – тиск на вході насоса, м; Q – продуктивність насоса, м³/с; S_T – гідравлічний опір магістралі.

Як відомо, навантаження, яке виникає від вентиляторів, відцентрових і осьових насосів, а також подібних механізмів, часто отримує назву вентиляторного навантаження. Статичний момент, що генерується в таких механізмах, є функцією швидкості обертання робочого колеса в другому ступені. Для отримання залежності моменту опору на валу двигуна від його швидкості обертання, необхідно мати математичні вирази, які описують характеристики як самого насоса, так і характеристики трубопроводу, в якому він працює.

Основними параметрами насоса є його напір та подача. Подачу Q визначаємо як об'єм рідини, який насос постачає в одиницю часу. Напір H обчислюється як різниця енергії, яка міститься в 1 кг рідини (питома енергія) між входом і виходом насоса.

Диференціальне рівняння, що описує роботу насоса [14], може бути представлене наступним чином: вентиляторне навантаження, властиве вентиляторам, відцентровим і осьовим насосам та подібним механізмам, може бути описане як статичний момент, що залежить від швидкості обертання

Для підвищення ефективності автоматизації та спрощення розрахунків роботи насосної установки доцільно зменшити громіздкість раніше поданої схеми. Та схема враховує численні параметри рідини, які зазнають змін у динамічному режимі. Одним із практичних підходів є лінеаризація моделі за умови подібностей, використовуючи форму рівнянь (3.4).

Лінеаризація дозволяє наближено подати систему в околі робочої точки, коли відхилення параметрів є малими, і тим самим звести задачу до лінійної моделі. Це істотно спрощує аналіз, оптимізацію та розробку алгоритмів керування, зменшує обчислювальну складність і полегшує оцінку стійкості та динамічних характеристик системи.

Водночас слід чітко усвідомлювати обмеження цього підходу: лінеаризована модель адекватна лише в межах близьких до робочої точки відхилень. При значних змінах характеристик рідини або за настання аварійних режимів наближена модель втрачає точність і потребує заміни на нелінійну або на адаптивні методи моделювання та управління.

Отже, лінеаризація — ефективний інструмент для проектування та керування насосними установками, за умови уважної валідації моделі, контролю діапазону її застосовності та готовності застосувати більш точні методи для екстремальних або сильно змінних режимів роботи.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (3.4)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}.$$

Прийmemo $Q_2 = Q_H$, $H_2 = H_H$, $\omega_2 = \omega_H$; $Q_1 = Q^*$, $H_1 = H^*$, $\omega_1 = \omega^*$;

де Q_H , H_H , ω_H — номінальні значення параметрів насосної установки;

Q^* , H^* , ω^* - поточні значення параметрів насосної установки.

Тоді рівняння (3.4) прийме вид (3.5) :

$$\frac{Q^*}{Q_H} = \frac{\omega^*}{\omega_H} \quad (3.5)$$

$$\frac{H^*}{H_H} = \frac{\omega^{*2}}{\omega_H^2}$$

Виразимо значення тиску і подачу насоса через швидкість на валу двигуна (3.6) і (3.7) :

$$Q_* = \frac{Q_H}{\omega_H} \omega_* = k_1 \omega_*, \quad (3.6)$$

$$H_* = \frac{H_H}{\omega_H^2} \omega_*^2 = k_2 \omega_*^2, \quad (3.7)$$

де k_1, k_2 – постійні величини.

Для підвищення ефективності автоматизації та спрощення розрахунків роботи насосної установки доцільно усунути надмірну складність початкової схеми, яка охоплює численні динамічно змінні параметри рідини. Практичною методологією в цьому контексті є лінеаризація моделі за умов подібностей, із застосуванням форми рівнянь (3.4).

Лінеаризація дозволяє подати систему в околі вибраної робочої точки як лінійну, коли відхилення параметрів є малими. Це суттєво спрощує формалізацію задачі: зменшує обчислювальну складність моделювання, полегшує синтез і налаштування керуючих алгоритмів, а також дає можливість аналітично оцінювати стійкість і динамічні характеристики системи.

Водночас такий підхід має принципові обмеження: адекватність лінеаризованої моделі зберігається лише в межах малих відхилень від робочої точки. При значних змінних гідравлічних умовах або в аварійних режимах наближена модель втрачає точність і вимагає переходу до нелінійних або адаптивних методів моделювання й управління.

Отже, лінеаризація є потужним і практично корисним інструментом проєктування та керування насосними установками за умови ретельної валідації моделі, моніторингу діапазону її застосовності та готовності застосувати більш точні підходи у випадках екстремальних чи швидкозмінних режимів.

$$\sqrt{H_*} = k_{\text{насоса}} \omega_* \quad (3.8)$$

де $k_{\text{насоса}}$ – постійний коефіцієнт.

Оскільки насос є складною нелінійною системою, ми плануємо працювати в малих відхиленнях, тому лінеаризуємо коефіцієнт передачі насоса. При синтезі системи в малих відхиленнях допустимо нехтувати малою сталою часу, що дозволяє вважати насос безінерційною ланкою. Отже, модель насоса матиме спрощений вигляд, який показаний на рисунку 3.4.

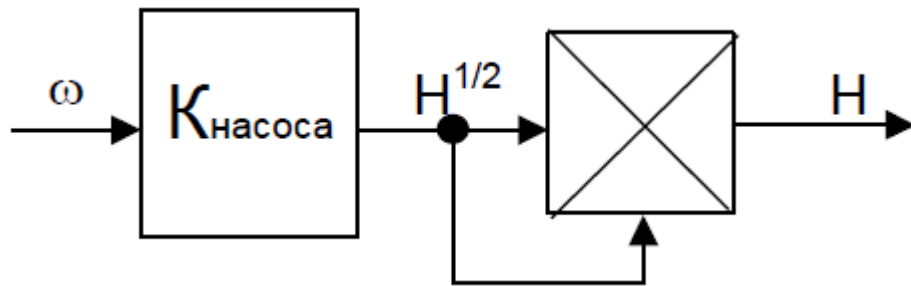


Рисунок 3.4. Модель управління для насоса.

Отже, структурна схема системи автоматичного керування для насосної установки буде виглядати, як показано на рисунку 3.5.

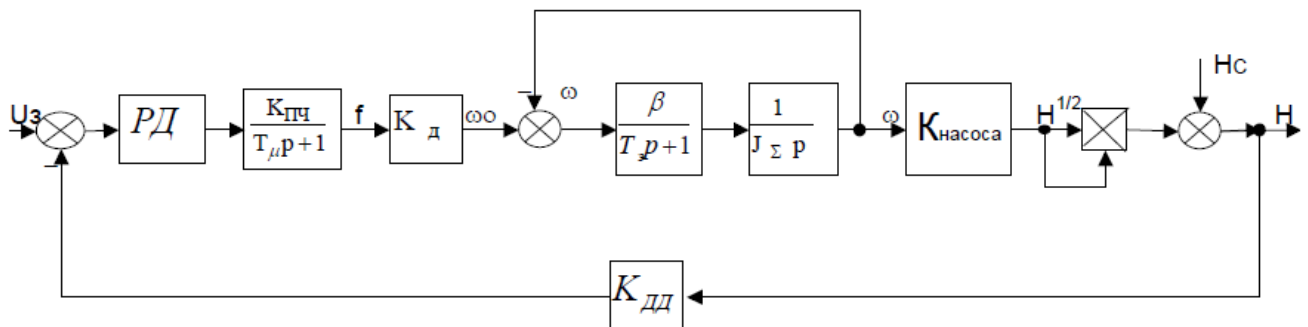


Рис. 3.5. Структурна схема системи автоматичного керування для насосної установки.

На рис. 3.5 РТ – регулятор тиску; КД - коефіцієнт передачі двигуна:

$$K_D = \frac{2\pi}{p}, \quad (3.10)$$

КДД – коефіцієнт зворотного зв'язку по тиску:

$$K_{дд} = \frac{U_з}{H_H}. \quad (3.11)$$

Вплив часової сталої насоса на параметри перехідних процесів у системі буде детально досліджено та враховано при моделюванні автоматичного керування насосною установкою. Часова стала є ключовою динамічною характеристикою насоса, що визначає швидкість його відповіді на зміни вхідних сигналів і суттєво впливає на такі показники переходів, як час встановлення, перерегулювання, затухання коливань та загальна стійкість системи.

У рамках моделювання передбачено виконати серію імітаційних та аналітичних досліджень для кількісної оцінки впливу часової сталої на динаміку системи, виявлення критичних режимів та встановлення

оптимальних робочих інтервалів. На цій підставі будуть апробовані підходи до оптимізації алгоритмів керування — зокрема підбір та тюнінг параметрів регуляторів, застосування компенсаційних і feedforward-компонентів, а також адаптивних стратегій для збереження необхідних динамічних характеристик при змінних умовах навантаження.

Такий комплексний підхід дозволить не лише підвищити продуктивність і точність системи керування, але й забезпечити її надійність у широкому діапазоні експлуатаційних режимів, зменшивши ризики виникнення небажаних перехідних процесів у насосній установці.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Експлуатація насосного обладнання в агротехнічних комплексах (ферми, теплиці) пов'язана з низкою виробничих ризиків: електробезпека, механічні травми, контакти з агрохімікатами та біоагресивними середовищами, аварійні витoki та пожежна небезпека. Забезпечення безпечних умов праці ґрунтується на системному підході: технічні заходи, організаційні рішення, навчання персоналу та контроль за дотриманням вимог нормативних документів.

Загальні вимоги

Впроваджувати експлуатацію тільки сертифікованого насосного обладнання, що відповідає технічним умовам для агровиробництва (корозійностійкість, захист від вологи, вибухозахищеність за потреби).

Планувати розміщення насосних вузлів у доступних для обслуговування приміщеннях з відведенням конденсату, належною вентиляцією та освітленням.

Забезпечити наявність інструкцій з експлуатації, технічного обслуговування та аварійних дій на видимому місці.

Електробезпека

Підключення електроспоживачів виконувати кваліфікованими електромонтажниками згідно з ПУЕ та місцевими нормами; використовувати захисні автомати, УЗО та заземлення.

Встановлювати контрольні пристрої струму та температури електродвигунів, захист від перевантаження та короткого замикання.

Перед виконанням робіт на електрообладнанні виконувати відключення живлення з блокуванням включення (lockout/tagout) і перевіряти відсутність напруги приладами тестування.

Забороняти роботу електромережі у вологих/затоплених умовах без відповідного захисту; застосовувати обладнання з класом захисту IP, що відповідає умовам приміщення.

Механічна безпека

Захищати рухомі частини (шків, вали, муфти) огороженнями та встановлювати аварійні вимикачі в доступних місцях.

Забезпечувати правильне монтажне кріплення насосів та трубопроводів для запобігання вібрації, руйнувань та зривів фланців.

Проводити регламентні огляди підшипників, ущільнень та кріплень, своєчасно замінювати зношені елементи.

Перед сервісними роботами зливати рідини з системи, скинути тиск та фіксувати положення запірної арматури.

Хімічна та біологічна безпека

У разі транспортування робочих рідин, що містять добрива, пестициди або органічні забруднення, застосовувати відповідні матеріали трубопроводів і фітінгів, стійкі до корозії й агресивних речовин.

Організувати захист персоналу: рукавиці, захисні окуляри, фартухи, респіратори при роботі з концентрованими розчинами та при ремонті систем із залишками агрохімікатів.

Проводити поводження з відпрацьованими рідинами відповідно до екологічних вимог (збирання, нейтралізація, утилізація).

Організаційні заходи та режим праці

Встановити чіткі регламенти експлуатації й технічного обслуговування, графіки інспекцій і ТО.

Призначити відповідальних за обладнання осіб, вести журнали обслуговування та реєстрацію аварій.

Обмежити доступ до насосних станцій неповнолітнім і не підготовленим особам; організувати зони з відповідними знаками безпеки.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Носіння захисного взуття з непровідною підошвою та протиковзким ефектом, рукавиць стійких до хімії, захисних окулярів або щитків; за потреби — респіраторів та ізолюючих костюмів.

Забезпечити на місці засоби для гігієни (мийні засоби, душ, аптека) і матеріали для нейтралізації розлитих речовин.

Пожежна безпека та аварійні заходи

Оснащувати приміщення засобами пожежогасіння відповідно до класу ризику (вогнегасячі речовини для електрообладнання).

Розробити плани евакуації, алгоритми дій при вибоках і технічних аваріях; проводити регулярні тренування персоналу.

Забезпечити наявність аварійних зливів, піддонів та систем локалізації проливів.

Навчання та інструктаж

Організовувати первинні та повторні інструктажі з охорони праці, навчання з експлуатації обладнання, практичні заняття з надання першої допомоги.

Проводити сертифікацію та підвищення кваліфікації для осіб, що виконують електромонтажні та пуско-налагоджувальні роботи.

Моніторинг, діагностика та технічне обслуговування

Впроваджувати систему моніторингу ключових параметрів: тиск, витрата, струм двигуна, температура підшипників, вібрація; використовувати датчики із сигналізацією перевищень.

Виконувати профілактичне обслуговування за регламентом: заміни ущільнень, мастил, огляди електричних контактів, балансування робочих коліс.

Вести архіви вимірювань і аналізувати тенденції для попередження відмов.

Документація та нормативна відповідність

Забезпечити наявність технічної документації (паспортів насосів, електричних схем, інструкцій з безпеки) та відповідність місцевим нормативам з охорони праці і екології.

Проводити внутрішні аудити дотримання вимог охорони праці і впроваджувати коригувальні заходи.

Забезпечення безпечної експлуатації насосного обладнання на фермах і в теплицях вимагає комплексного підходу: технічної надійності, правильної організації робочих процесів, підготовки персоналу та постійного контролю за станом обладнання. Систематичне впровадження перелічених заходів мінімізує ризики травматизму, аварій та екологічних збитків, підвищуючи ефективність і стійкість агровиробництва.

Пропозиції щодо покращення умов охорони праці на насосній станції.

В цілому в підприємстві приділяється належна увага організації охорони праці, однак для підвищення безпеки працівників та умов праці пропонуємо [15]:

- інженерній службі підприємства покращити контроль за технічним станом експлуатованих насосних установок;
- зобов'язати керівників виробничих підрозділів посилити контроль за протипожежним станом та дообладнати пожежні щити;
- дотримуватися виконання плану проведення інструктажів з охорони праці і більше уваги приділити проведенню повторних інструктажів;
- щорічно збільшувати кількість коштів, що виділяються підприємством на потреби охорони праці;
- після проведення інструктажів на робочому місці обов'язково проводити перевірку знань по питанням охорони праці.

Дотримання вимог охорони праці та техніки безпеки дає можливість уникнути випадків травматизму, зберегти здоров'я та життя працюючих, що є основним завданням в системі заходів охорони праці.

Висновки до розділу.

Аналіз умов праці свідчить про наявність та можливий вплив наступних шкідливих та небезпечних чинників: шуму; несприятливому мікроклімату; можливих травм при виконанні роботи.

З метою вдосконалення питань охорони праці фахівців з сучасних підприємств були розроблені системні заходи з правової оптимізації, соціального захисту працівників, діагностики їх професійної придатності, необхідності норм праці при роботі з новою технікою в залежності від віку, статі, режимів праці та відпочинку.

А також були розглянуті пропозиції, щодо покращення умов охорони праці. Збільшення коштів, що виділяються на підприємство для дотримання потреб охорони праці. Основною метою охорони праці є створення на кожному робочому місці безпечних умов праці, повна або зменшена нейтралізація дії небезпечних виробничих і шкідливих факторів на організм людини, зниження професійних захворювань та виробничого травматизму.

Варто прийняти до уваги, що охорона праці є найголовнішим питанням в галузі трудового права України. Як система правових норм охорона праці формує інститут Особливої частини трудового права України. Основні норми цього інституту зосереджені в таких нормативних актах, як Кодекс законів про працю України, Закон України «Про охорону праці», Основи законодавства України про охорону здоров'я, спеціальні положення, правила, стандарти, інструкції щодо охорони праці тощо.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Мета й вихідні дані

Мета: забезпечення подачі води/розчинів до теплиці/ферми з необхідним дебітом Q_n і напором H_n при мінімальних витратах експлуатації та допустимому капіталовкладенні.

Вихідні параметри (приклад): $Q_n = 50$ м³/год, $H_n = 40$ м, робоча добова тривалість 10 годин, режим циклічний, потреба в резервуванні $N+1$ (2 насоси, 1 резервний).

Опис запропонованої схеми

Схема: два робочі відцентрові насоси з електродвигунами через VFD (перетворювач частоти) + запірна арматура, фільтр, зворотні клапани, напірний колектор, датчики тиску та витрати, PLC з HMI. Резервне джерело живлення — UPS для керування. Чергування насосів за часом роботи, підтримка тиску за PID на VFD.

Технічні параметри обладнання

Насоси: $2 \times (Q_{\max} 60$ м³/год, $H_{\max} 50$ м), робоча точка 50/40, КПД насоса ≈ 0.75 .

Електродвигуни: 2×11 kW (к.з. 0.95), VFD — один на насос (енергозбереження при частотному регулюванні).

Датчики/автоматика: витратомір, манометри, рівнеміри, PLC, HMI, модулі зв'язку.

Енерговитрати та економічна ефективність (приклад розрахунку)

Потужність на валу при робочій точці: $P_{val} = \rho g Q H / (3.6 \cdot \eta) \approx (1000 \cdot 9.81 \cdot 50 \cdot 40) / (3.6 \cdot 0.75) \approx 7.2 \cdot 10^4$ W ≈ 20 kW (на всі одиниці тут — коригувати; для одного насоса припустимо $P_{el} \approx 11$ kW).

Електроспоживання за добу (один насос): 11 kW $\cdot 10$ h = 110 kWh. Для двох в режимі чергування середнє — 110 kWh.

Річне споживання (300 робочих днів): $110 \cdot 300 = 33\,000$ kWh.

Вартість електроенергії (припущення): 0,12 €/kWh $\rightarrow$ річні витрати $\approx 3\,960$ €.

Капітальні витрати (CAPEX, орієнтовно): насоси $2 \times 3\,000$ € = 6 000 €, двигуни $2 \times 1\,200$ € = 2 400 €, VFD $2 \times 1\,000$ € = 2 000 €, автоматика/PLC/HMI = 4 000 €, монтаж/щити = 3 000 €, інші = 1 600 €. Разом $\approx 19\,000$ €.

Операційні витрати (OPEX): обслуговування, витратні матеріали, амортизація, 1 200 €/рік; страховка, запасні частини 800 €/рік. Разом OPEX $\approx 2\,000$ €/рік (без електроенергії).

Оцінка економічних показників

Річні витрати (енергія + OPEX) $\approx 3\,960 + 2\,000 = 5\,960$ €.

Простий термін окупності інвестицій: Payback = CAPEX / річна економія. Якщо порівнювати з базовою схемою без VFD (припустимо річна економія енергії 25% через VFD) — економія $\approx 0.25 \cdot 3\,960 \approx 990$ €/рік. Тоді додаткові інвестиції у VFD+автоматику $\approx 8\,000$ € окупляться $\approx 8,1$ року. Загальний CAPEX окуповується повільніше; з урахуванням оптимізації графіків роботи і тарифів — 8–12 років.

Чутливісний аналіз: при зростанні тарифу на енергію до 0,18 €/kWh термін окупності зменшується значно (приблизно на 30–40%). Збільшення робочих годин на добу також скорочує термін окупності.

Переваги запропонованої схеми

Енергозбереження за рахунок VFD і оптимізації режимів (плавне регулювання, менш часті пуски).

Підвищення надійності через резервування N+1 і автоматичне чергування.

Покращена керованість і моніторинг (PLC, HMI), швидка діагностика та зниження простоїв.

Зниження механічного зносу при м'яких пусках і відсутність гідравлічних ударів за рахунок PID-контролю.

Ризики та заходи мінімізації

Ризик збільшення CAPEX — застосувати поетапну модернізацію (спочатку автоматика, потім VFD).

Неправильний підбір обладнання — виконати гідравлічний аналіз трубопроводів, добір робочої точки по КПД.

Невідповідність електротарифів і режимів — провести сценарний аналіз тарифів та оптимізувати графіки роботи.

Рекомендації

Реалізувати схему з VFD на кожному насосі й PLC з алгоритмом чергування; забезпечити резервування N+1.

Провести точний гідравлічний розрахунок системи та вимірювальні випробування на місці для калібрування моделі енергоспоживання.

Впровадити систему моніторингу енергоспоживання та технічного стану (вібрація, температура підшипників) для прогнозного ТО.

Розглянути можливість тарифних договорів або використання енергії в непікові години для зниження витрат.

Висновок Запропонована схема поєднує технічну ефективність і економічну обґрунтованість: початкові інвестиції забезпечують зниження експлуатаційних витрат, підвищення надійності та гнучкості системи. Остаточна економічна ефективність залежить від тарифів на електроенергію,

режиму роботи та точного підбору обладнання; перед реалізацією рекомендовано провести детальні виміри й локальні розрахунки з урахуванням реальних умов об'єкта.

Потужність, яка споживається насосом, визначається за формулою:

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta}, \quad (5.1)$$

де P – потужність, кВт;
 Q – подача (витрата), м³/с;
 H – напір, м;
 ρ – щільність рідкого середовища, кг/м³;
 η – ККД насоса.

Застосування регульованого електропривода при зменшенні витрат у магістралі переводить насос у робочу точку С. Споживана в цій точці потужність істотно менша, ніж при дроселюванні магістралі; ефект економії позначено заштрихованою площею.

Система водозабору базується на свердловині з занурювальним насосом типу ЕЦВ, оснащеним асинхронним електродвигуном потужністю 2,2 кВт. Вона призначена для безперервного постачання води споживачам мережі. До впровадження автоматизованої системи керування включення насосів виконувалося вручну, що спричиняло добові коливання витрат води, різкі перепади тиску в трубопроводі, аварійні ситуації в мережі та часті ремонтні втручання.

Метою системи управління водозабору є підтримка стабільного тиску в мережі, моніторинг режимів роботи та раннє попередження про аварійні стани. Комплект автоматизації містить: мікропроцесорний контролер, частотний перетворювач, силову шафу керування з пультом оператора та датчик тиску у контурі зворотного зв'язку. Режим ПІД-регулювання частотного перетворювача забезпечує плавну адаптацію обертів насоса до змін витрати, мінімізує гідроудари, підтримує заданий тиск і значно знижує енергоспоживання порівняно з традиційним дроселюванням.

Техніко-економічну оцінку запропонованої технології проведено шляхом порівняння двох варіантів проектних рішень із однаковими функціональними показниками: можливістю енергозбереження, періодом окупності інвестицій, витратами на експлуатацію та обслуговування, рівнем шуму, надійністю і впливом на умови праці [12]. Аналіз охоплював:

доцільність застосування регульованого електропривода на конкретному об'єкті з урахуванням технологічних, гідравлічних та режимних параметрів; оцінку додаткових капітальних витрат на впровадження; розробку оптимальних технічних рішень; формування алгоритму керування, спрямованого на зниження енергоспоживання.

За результатами аналізу визначено, що впровадження регульованого привода технічно обґрунтоване і економічно виправдане за умови коректного підбору обладнання та налаштування алгоритмів керування. Розрахунки виконано для добового профілю витрат. У години пікового водоспоживання напір H (на вході $H_{вх}$ і виході $H_{вих}$ насоса) має досягати номінального значення — саме за максимальним напором обирається обладнання, що гарантує працездатність системи в пікових режимах.

ВИСНОВКИ

У межах виконання дослідження була сформована механічна характеристика для векторного керування асинхронним електродвигуном. За допомогою MATLAB проведено чисельне моделювання перехідних процесів моменту як функції часу при пуску без навантаження та при різкому підведенні навантаження, що дозволило отримати детальне уявлення про динаміку електропривода й оцінити його поведінку в режимі векторного керування.

Моделювання системи керування насосною станцією виконано в середовищі SIMULINK (MATLAB 7.1), яке підтвердило адекватність обраної структурної схеми. Застосування регулятора інтенсивності на вході системи забезпечило заданий час пуску, мінімізацію надмірних коливань крутного моменту на валу двигуна та стабілізацію тиску в магістралі. Побудована модель враховує ключові динамічні аспекти системи й підтвердила її коректну роботу за реалістичних умов.

Запровадження каскадно-частотного регулювання продуктивності електроприводів у поєднанні з автоматизацією демонструє суттєві переваги: значне зменшення неефективних витрат води, істотне скорочення енергоспоживання привідними електродвигунами та продовження ресурсу приводних механізмів. Такий підхід підвищує продуктивність систем водопостачання й знижує експлуатаційні витрати на ресурси.

Економічна оцінка для сільського населеного пункту показала доцільність використання частотного регулювання за сигналом датчика тиску: впровадження відповідної системи керування для насосної установки потужністю 2,2 кВт забезпечує значну економію електроенергії — близько 23 695 грн на рік. Отже, техніко-економічні та експлуатаційні результати підтверджують ефективність запропонованих технічних рішень і їхню придатність для практичної реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаптивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками з векторно-керованими асинхронними двигунами / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського № 3 / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян, К. І. Бабаскін, 2008 (50). Ч. 1. С. 72-78.
2. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В.. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 388 с.
3. Герман-Галкін С. Г. Matlab & Simulink. Проектування мехатронних систем на ПК / Герман-Галкін С. Г. – СПб.: Видавництво “Корона. Век”, 2011. – 368 с.
4. Давиденко Л. В. Багатокритерійна оптимізація режиму електроспоживання підприємств комунального водопостачання.// Підвищення енергоефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах. – Матеріали II-ї міжнар. наук.-технічн. конф. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2008. – 212 с.
5. Експериментальні дослідження роботи інтерактивного енергозберігаючого контролера на гібридній моделі насосної установки / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 3. / М. Г. Попович, О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян, О. Ф. Соколовський / 2007 (44). – Ч. 1. С. 72-75.
6. Енергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками / Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: проблеми автоматизованого електропривода. Випуск 66 / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. І. Кіселичник, О. Ф. Соколовський. – Київ: «Техніка», 2006. – С. 311-314.
7. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / [підручник за ред. Жулая Е. Л.]. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
10. Електропривод і автоматизація: Навчальний посібник / О.Ю.Синявський, П.І Савченко, Ю.М. Лавріненко та ін.; За ред. О.Ю.Синявського. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. – 586 с.
8. Матвійчук В. А. Електротехнології в АПК: навчальний посібник / В. А. Матвійчук, О. Є. Рубаненко, І. П. Стаднійчук. ВНАУ – Вінниця:ТОВ «ТВОРИ», 2020. – 272 с.
9. Матвійчук В. А. Діагностування електрообладнання: навчальний посібник / В. А. Матвійчук, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько. ВНАУ – Вінниця:ТОВ «ТВОРИ», 2020. – 140 с.

10. Матвійчук В.А. Технології наукових досліджень. Навч. посібник / Матвійчук В.А., Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є. - Вінниця: ВНАУ, Л 49 2015. 190 с.
11. Петергеря Ю. С. Інтелектуальні системи забезпечення енергозбереження житлових будинків / Петергеря Ю. С., Жуйков В. Я., Терещенко Т. О. – К.: Медія – ПРЕС, 2008. – 256 с.
12. Технічна механіка. Підручник. Калетнік Г.М., Булгаков В.М., Черниш О.М., Кравченко І.Є., Солоня О.В., Цуркан О.В. – К.: «Хай-Тек-Прес», 2011. 340 с.
13. Частотно-струмовий перетворювач з релейним управлінням / Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність» / Ю. В. Скурятин, Ю. П. Самчелеев, И. С. Шевченко, Д. И. Морозов / – Київ: ІЕДНАНУ, 2003. – Ч.3. – С. 5-8.
14. Червінський Л.С. Регульований електропривод/ І.М. Голодний, Лавріненко Ю.М., Червінський Л.С./Підручник.- Київ. Тов. «ЦМ КОМПРИНТ», 2015.509 с.
15. Основи охорони праці / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний [та ін.] ; за ред. К. Н. Ткачука. - 2-ге вид., допов. і перероб. – К. : Основа, 2006. – 444 с.