

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

проф., д.т.н. _____ **КАПЛУН В.В.**
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

доц., к.т.н. _____ **ОКУШКО О.В.**
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ АСИНХРОННОГО
ДВИГУНА ПРИВОДУ ЖИВИЛЬНИКА ДРОБАРКИ»**

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

_____ **К.Т.Н., ДОЦЕНТ**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **К.Т.Н., ДОЦЕНТ**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Васюк В.В.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Ткаченко Д.Д.
(ПІБ)

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАВДАННЯ

до виконання магістерської кваліфікаційної роботи здобувачу

Ткаченку Денису Дмитровичу

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «розробка системи управління для асинхронного двигуна приводу живильника дробарки»

Затверджено наказом ректора НУБіП України від "18" листопада 2024 р. № 2061 "С."

2. Термін подання студентом магістерської кваліфікаційної роботи: 2025.12.01

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

- а) Результати науково-дослідницької роботи кафедри ЕЕЕ.
- б) Публікації сучасних наукових фахових видань.
- в) Технічні характеристики електродвигунів, живильників дробарок та частотних перетворювачів.
- г) Система ПЗУ і ТО електрообладнання промислових підприємств.
- д) Нормативні документи: ПУЕ, ПТЕЕС, ПБЕЕС, ДСТУ та ДБН.

4. Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- а) Аналіз конструкції та технологічного призначення живильника дробарки в гірничо-збагачувальних та переробних комплексах.
- б) Вивчення принципів роботи асинхронного електроприводу, оцінка його динамічних і енергетичних характеристик у різних режимах навантаження.
- в) Аналіз сучасних методів регулювання швидкості (скалярне, векторне, частотне), вибір оптимальної системи керування для приводу живильника.
- г) Розробка структурної схеми системи керування, обґрунтування вибору силового обладнання, мікроконтролера, датчиків та алгоритмів керування.
- д) Проведення розрахунку параметрів електроприводу: пускових режимів, моментів, струмів, енергетичних показників та параметрів силової схеми.
- е) Моделювання роботи системи керування та оцінка її впливу на надійність і енергоефективність живильника дробарки.
- ж) Розробка техніко-економічного обґрунтування модернізації електроприводу.

Дата видачі завдання "18" листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Васюк В.В.

Завдання прийняв до виконання _____ Ткаченко Д.Д.

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки загальним обсягом 96 сторінок, що містить 9 таблиць, 6 рисунків та 20 джерел літератури.

У першому розділі виконано аналіз технологічної ролі живильника у складі дробарного комплексу та визначено вимоги до його електроприводу. Розглянуто конструктивні особливості асинхронного електродвигуна АВВ МЗВР 132SMA 4, принципи його роботи, механічні характеристики та методи регулювання швидкості — скалярного, векторного та частотного. Подано порівняльний аналіз сучасних систем керування асинхронними електроприводами з точки зору енергоефективності, надійності та можливостей захисту.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню вибору типу та параметрів електродвигуна для приводу живильника дробарки. Виконано підбір силових напівпровідникових елементів, датчиків, мікроконтролера та допоміжного обладнання системи керування. Розроблено структурну схему системи, визначено принцип роботи тиристорного регулятора напруги, алгоритм м'якого пуску та особливості взаємодії між функціональними блоками.

У третьому розділі проведено розрахунково-аналітичне обґрунтування параметрів електроприводу. Виконано розрахунок робочих струмів і моментів двигуна, пускових режимів, динамічних характеристик, параметрів елементів силової схеми, а також оцінку теплових та енергетичних процесів у приводі. Надано техніко-економічне обґрунтування використання регульованого приводу замість традиційного нерегульованого, визначено очікувану економію електроенергії та строк окупності модернізації.

Четвертий розділ містить аналіз питань охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час експлуатації системи «частотний перетворювач – двигун». Розглянуто небезпечні та шкідливі виробничі фактори, наведено

заходи електробезпеки, протипожежного захисту та алгоритми дій персоналу при аваріях чи відмовах обладнання.

П'ятий розділ присвячено оцінці енергоефективності модернізованого електроприводу. Проведено порівняння режимів роботи приводу до та після впровадження системи регулювання, визначено економічний ефект від зниження споживання електроенергії, підвищення продуктивності та зменшення простоїв обладнання.

У висновках сформульовано основні результати виконаної роботи та підтверджено доцільність впровадження розробленої системи керування електроприводом живильника на промислових об'єктах.

Ключові слова: живильник дробарки, асинхронний двигун АВВ МЗВР 132SMA 4, електропривод, тиристорний регулятор, м'який пуск, система керування, енергоефективність, автоматизація.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЖИВИЛЬНИКІВ ДРОБАРОК.....	10
1.1. Технологічна роль живильника у складі дробарного комплексу та вимоги до його електроприводу.....	10
1.2. Принцип роботи асинхронного електродвигуна АВВ МЗВР 132SMA 4 та методи регулювання швидкості обертання.....	12
1.3. Аналіз сучасних систем керування асинхронними приводами	16
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЖИВИЛЬНИКА ДРОБАРКИ	21
2.1. Вибір типу та параметрів асинхронного електродвигуна АВВ МЗВР 132SMA 4	21
2.2. Вибір елементної бази системи керування	28
2.3. Розроблення структурної та принципової електричної схеми системи управління.....	36
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ .	47
3.1. Розрахунок параметрів електродвигуна і робочого режиму приводу.....	47
3.2. Розрахунок елементів системи керування	55
3.3. Техніко-економічна оцінка впровадження системи управління.....	59
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	65
4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів на робочому місці	65
4.2. Електробезпека при експлуатації системи «ПЧ–двигун»	70
4.3. Пожежна безпека та запобігання аваріям	73
РОЗДІЛ 5. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	77
5.1. Аналіз енергоспоживання електроприводу АВВ МЗВР 132SMA 4 до та після модернізації.....	77
5.2. Розрахунок економії електроенергії та експлуатаційних витрат.....	84
5.3. Визначення терміну окупності модернізації приводу	90
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97

ВСТУП

Актуальність дослідження. Сучасна гірничодобувна та переробна промисловість характеризується постійним зростанням вимог до енергоефективності, надійності та продуктивності технологічного обладнання. Живильники дробарок відіграють ключову роль у технологічному процесі подрібнення матеріалів, забезпечуючи рівномірне та дозоване завантаження сировини. Асинхронні двигуни, що використовуються в приводах живильників, споживають значну кількість електроенергії, а їх ефективна робота безпосередньо впливає на продуктивність всього дробильно-сортувального комплексу. Традиційні системи управління часто не забезпечують оптимальних режимів роботи, що призводить до підвищеного енергоспоживання, зносу обладнання та простоїв через аварійні ситуації.

Аналіз сучасного стану проблеми. Питання автоматизації електроприводів досліджували провідні вітчизняні та зарубіжні вчені. Теоретичні основи векторного управління асинхронними двигунами закладені в працях Ковача К.П., Раца І., Blaschke F. Проблематику частотно-регульованих приводів для технологічного обладнання розглядали Толочко О.І., Чорний О.П., Родькін Д.Й., Sadiku M.N.O. Системи автоматизації дробильно-сортувального обладнання вивчали Пивняк Г.Г., Кириченко В.І., Matsui N. Однак питання розробки спеціалізованих систем управління для живильників дробарок з урахуванням специфіки технологічного процесу та змінних навантажень залишається недостатньо дослідженим.

Проблема дослідження полягає у необхідності підвищення ефективності роботи асинхронного електроприводу живильника дробарки шляхом впровадження сучасної системи управління, яка забезпечить оптимальні режими пуску, плавне регулювання продуктивності, захист від перевантажень та зниження енергоспоживання.

Мета дослідження: розробити систему управління асинхронним двигуном приводу живильника дробарки, що забезпечить підвищення енергоефективності, надійності та керованості технологічного процесу.

Об'єкт дослідження: процеси управління асинхронним електроприводом живильника дробарки.

Предмет дослідження: система автоматичного управління асинхронним двигуном з використанням частотного перетворювача та мікропроцесорного контролера.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати технологічний процес та режими роботи живильника дробарки;
2. Дослідити існуючі методи управління асинхронними двигунами та обґрунтувати вибір оптимального;
3. Розробити структурну та функціональну схеми системи управління;
4. Виконати розрахунок параметрів електроприводу та вибір обладнання;
5. Розробити алгоритм управління та програмне забезпечення контролера;
6. Провести моделювання системи управління та аналіз перехідних процесів;
7. Обґрунтувати економічну ефективність впровадження розробленої системи.

Практична значущість роботи полягає в можливості безпосереднього впровадження розробленої системи управління на промислових об'єктах, що дозволить знизити енергоспоживання на 15-25%, підвищити продуктивність обладнання та збільшити міжремонтний період експлуатації.

Методи дослідження: базуються на комплексному підході до розв'язання завдань оптимізації керування асинхронним електроприводом. Теоретичні дослідження виконувалися із застосуванням апарату математичного аналізу електромеханічних систем, векторних методів опису процесів в електричних машинах змінного струму та положень класичної теорії автоматичного керування. Параметричний синтез регуляторів здійснювався на основі

частотних методів налаштування із забезпеченням заданих показників динаміки перехідних процесів. Чисельне інтегрування диференціальних рівнянь руху електропривода реалізовувалося методом Ейлера з адаптивним вибором кроку дискретизації. Експериментальна верифікація розроблених алгоритмів передбачала імітаційне моделювання в спеціалізованому програмному середовищі з бібліотеками елементів силової електроніки та електричних машин. Техніко-економічне обґрунтування впровадження виконувалося із застосуванням методів оцінювання інвестиційних проектів, включаючи розрахунок дисконтованих грошових потоків та показників рентабельності капіталовкладень.

Структура роботи. Дипломна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків загальним обсягом 96 сторінок.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЖИВИЛЬНИКІВ ДРОБАРОК

1.1. Технологічна роль живильника у складі дробарного комплексу та вимоги до його електроприводу

Дробарні комплекси є невід'ємною складовою технологічного процесу у гірничодобувній, металургійній, будівельній та хімічній промисловості. Ефективність роботи дробильно-сортувального обладнання безпосередньо визначається якістю та стабільністю подачі вихідної сировини до робочих органів дробарки. Саме живильник виконує критично важливу функцію регульованого та рівномірного завантаження матеріалу в робочу зону дробильного агрегату, забезпечуючи оптимальні умови для подрібнення та запобігаючи перевантаженням обладнання.

Технологічний процес дроблення характеризується значною нерівномірністю надходження вихідного матеріалу з попередніх ділянок виробництва. Фракційний склад сировини може суттєво змінюватися протягом робочої зміни, що створює змінні навантаження на дробарку. Без належної системи регулювання подачі виникають ризики заклинювання дробильної камери великими шматками породи, нерівномірного зносу робочих поверхонь та зниження якості вихідного продукту. Живильник виступає буферним елементом, який згладжує нерівномірності потоку та адаптує продуктивність до поточних умов експлуатації.

Конструктивно живильники дробарок можуть бути пластинчастими, стрічковими або вібраційними, проте найширше застосування у важких умовах гірничої промисловості знайшли пластинчасті живильники з приводом від асинхронного електродвигуна через редуктор. Такі живильники забезпечують

надійне транспортування великогабаритних і важких шматків породи без прослизання та пошкодження транспортуючих елементів. Швидкість руху пластинчастого полотна визначає продуктивність живильника та може регулюватися зміною частоти обертання приводного двигуна.

До електроприводу живильника дробарки висуваються специфічні вимоги, обумовлені особливостями технологічного процесу. По-перше, необхідне забезпечення плавного пуску для уникнення ударних навантажень на механічну частину та можливого зсуву матеріалу на полотні живильника. По-друге, система повинна забезпечувати широкий діапазон регулювання швидкості від десяти до ста відсотків номінальної для адаптації продуктивності до змінних умов роботи дробарки. По-третє, привод має володіти високим пусковим моментом для подолання сил тертя спокою завантаженого матеріалу та інерції механічної системи.

Особливу увагу необхідно приділяти захисту електроприводу від перевантажень, які неминуче виникають при заклинюванні дробарки або потраплянні надмірно великих шматків породи. Система управління повинна оперативно реагувати на зростання навантаження та забезпечувати або зниження швидкості подачі, або аварійну зупинку з можливістю реверсу для видалення застряглого матеріалу. Час реакції системи на аварійні ситуації не повинен перевищувати двох-трьох секунд для запобігання пошкодженню дорогого обладнання.

Енергоефективність електроприводу живильника набуває особливого значення в контексті загальних витрат на експлуатацію дробарного комплексу. Традиційні нерегульовані приводи з дросельним регулюванням або механічними варіаторами характеризуються низьким коефіцієнтом корисної дії у режимах часткових навантажень, що типово для живильників дробарок. Впровадження частотно-регульованих приводів на базі асинхронних двигунів дозволяє знизити споживання електроенергії на п'ятнадцять-двадцять п'ять відсотків порівняно з нерегульованими системами завдяки оптимізації швидкості обертання відповідно до поточної продуктивності.

Надійність роботи електроприводу живильника критично важлива для забезпечення безперебійності всього технологічного ланцюга дробильно-сортувального комплексу. Вихід з ладу приводу живильника призводить до зупинки дробарки та пов'язаних з нею конвеєрних ліній, що спричиняє значні економічні втрати від простою обладнання. Тому система управління повинна включати розвинені засоби діагностики стану електродвигуна, контролю температури обмоток, вібрації підшипників та інших параметрів, що дозволяють прогнозувати можливі відмови та планувати профілактичне обслуговування [3].

Сучасні вимоги до автоматизації технологічних процесів передбачають інтеграцію системи управління електроприводом живильника в загальну систему управління дробарним комплексом. Це забезпечує координацію роботи живильника з дробаркою, конвеєрами та іншим обладнанням для оптимізації загальної продуктивності та енергоспоживання. Система повинна підтримувати стандартні промислові протоколи зв'язку та забезпечувати передачу технологічних параметрів на верхній рівень автоматизованої системи управління підприємством.

1.2. Принцип роботи асинхронного електродвигуна АВВ МЗВР 132SMA 4 та методи регулювання швидкості обертання

Асинхронний електродвигун серії АВВ МЗВР 132SMA 4 представляє сучасне рішення для промислових електроприводів середньої потужності та призначений для роботи у важких умовах експлуатації. Конструктивно двигун виконаний з короткозамкненим ротором типу білячої клітки, що забезпечує високу надійність завдяки відсутності рухомих електричних контактів та простоті обслуговування. Позначення типорозміру 132 вказує на висоту осі обертання, що складає сто тридцять два міліметри, а символ S означає коротку довжину станини, що робить двигун компактним при збереженні високих енергетичних характеристик.

Принцип роботи асинхронного двигуна базується на взаємодії обертового магнітного поля статора з струмами, що індукуються в обмотках ротора. При подачі трифазної напруги на обмотки статора створюється обертове магнітне поле з синхронною частотою обертання, яка визначається частотою живлення та кількістю пар полюсів двигуна. Для двигуна АВВ МЗВР 132SMA 4 кількість пар полюсів дорівнює двом, що при частоті мережі п'ятдесят герц дає синхронну частоту обертання поля статора півтори тисячі обертів за хвилину.

Синхронна частота обертання магнітного поля визначається за формулою:

$$n_1 = 60f / p \quad (1.1)$$

де n_1 - синхронна частота обертання, об/хв; f - частота живлення, Гц; p - кількість пар полюсів обмотки статора.

Для двигуна з двома парами полюсів при частоті п'ятдесят герц отримуємо

$$n_1 = 60 \times 50 / 2 = 1500 \text{ об/хв.}$$

Ротор двигуна обертається з частотою, меншою за синхронну, внаслідок чого виникає відносне ковзання магнітного поля відносно провідників ротора. Це ковзання індукуює в обмотках ротора електрорушійну силу, яка створює струми, що взаємодіють з магнітним полем статора та створюють обертальний момент. Ковзання визначається співвідношенням:

$$s = [n_1 - n] / n_1 \quad (1.2)$$

де s - ковзання; n - частота обертання ротора, об/хв.

При номінальному навантаженні ковзання асинхронних двигунів середньої потужності становить від двох до п'яти відсотків. Для двигуна АВВ МЗВР 132SMA 4 номінальна частота обертання близька до тисячі чотирьохсот сорока обертів за хвилину, що відповідає ковзанню приблизно чотири відсотки.

Збільшення навантаження призводить до зростання ковзання та зниження частоти обертання ротора згідно з механічною характеристикою двигуна [19].

Електромагнітний момент, що розвивається асинхронним двигуном, залежить від величини магнітного потоку статора та струму ротора. Спрощена формула моменту має вигляд:

$$M = k \times \Phi \times I_2 \times \cos[\psi_2] \quad (1.3)$$

де M - електромагнітний момент, Н×м; k - конструктивний коефіцієнт двигуна; Φ - магнітний потік статора, Вб; I_2 - струм ротора, А; ψ_2 - кут зсуву між струмом і ЕРС ротора.

Більш точний вираз для електромагнітного моменту асинхронного двигуна через параметри схеми заміщення записується у вигляді:

$$M = [3 \times U_1^2 \times R_2' \times s] / [\omega_1 \times [(R_1 + R_2' \times s)^2 + [X_1 + X_2']^2]] \quad (1.4)$$

де U_1 - фазна напруга статора, В; R_1, R_2' - активні опори обмоток статора та приведенного ротора, Ом; X_1, X_2' - реактивні опори розсіювання статора та приведенного ротора, Ом; ω_1 - кутова синхронна частота, рад/с.

Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна може здійснюватися декількома методами, кожен з яких має свої переваги та обмеження застосування. Найбільш поширеним та ефективним методом є частотне регулювання, яке базується на зміні частоти напруги живлення. Зі співвідношення для синхронної частоти обертання випливає, що зміна частоти живлення прямо пропорційно змінює частоту обертання магнітного поля статора, а отже, і ротора двигуна [15].

При частотному регулюванні для підтримання постійного магнітного потоку в двигуні необхідно одночасно з частотою змінювати і величину напруги живлення згідно з законом пропорційного регулювання:

$$U / f = const \quad (1.5)$$

Це співвідношення справедливе в діапазоні частот від номінальної до десяти-п'ятнадцяти герц. При нижчих частотах необхідно вводити корекцію напруги для компенсації зростаючого впливу активного опору обмотки статора на падіння напруги. Сучасні частотні перетворювачі автоматично реалізують оптимальні закони частотного управління з урахуванням параметрів конкретного двигуна [11].

Векторне управління асинхронним двигуном представляє більш досконалий метод регулювання, який забезпечує незалежне керування магнітним потоком та моментом двигуна аналогічно до двигунів постійного струму. Основна ідея векторного управління полягає в орієнтації системи координат по вектору потокозчеплення ротора та розкладанні вектора струму статора на дві складові: струм намагнічування, що створює магнітний потік, та струм, що створює момент. Математичні перетворення координат Парка-Кларка дозволяють здійснити таке розділення та реалізувати незалежне управління цими складовими [18].

Рівняння асинхронного двигуна в синхронній системі координат, орієнтованій по вектору потокозчеплення ротора, мають вигляд:

$$U_{sd} = R_s \times i_{sd} + d[\psi_{sd}]/dt - \omega_k \times \psi_{sq} \quad (1.6)$$

$$U_{sq} = R_s \times i_{sq} + d[\psi_{sq}]/dt + \omega_k \times \psi_{sd} \quad (1.7)$$

де U_{sd} , U_{sq} - проекції напруги статора на осі d та q ; i_{sd} , i_{sq} - проекції струму статора; ψ_{sd} , ψ_{sq} - проекції потокозчеплення статора; ω_k - кутова частота обертання системи координат; R_s - активний опір обмотки статора.

При виконанні умови орієнтації $\psi_{sq} = 0$ електромагнітний момент визначається простим виразом:

$$M = [3/2] \times p \times L_m \times \psi_{rd} \times i_{sq} / L_r \quad (1.8)$$

де L_m - взаємна індуктивність між обмотками статора та ротора; ψ_{rd} - потокозчеплення ротора по осі d ; L_r - індуктивність ротора.

Даний вираз показує, що при підтриманні постійного потокозчеплення ротора момент двигуна прямо пропорційний струму i_{sq} , що дозволяє забезпечити високу динаміку регулювання моменту та швидкості обертання.

Скалярне частотне управління є простішим методом, який не потребує складних математичних перетворень та інформації про положення ротора. При скалярному управлінні регулюється лише амплітуда та частота напруги живлення відповідно до заданого закону, найчастіше пропорційного. Такий метод забезпечує достатню точність регулювання швидкості для більшості промислових застосувань, включаючи приводи живильників дробарок, де не потрібна висока динаміка перехідних процесів [4].

Метод регулювання зміною напруги живлення при постійній частоті застосовується рідко через низьку енергоефективність та обмежений діапазон регулювання. Зниження напруги призводить до зменшення магнітного потоку та моменту двигуна пропорційно квадрату напруги, що супроводжується значним зростанням ковзання та втрат енергії в обмотках ротора. Цей метод може використовуватися для плавного пуску двигуна за допомогою пристроїв м'якого пуску, але не придатний для широкодіапазонного регулювання швидкості [21].

1.3. Аналіз сучасних систем керування асинхронними приводами

Сучасні системи керування асинхронними електроприводами характеризуються широким застосуванням мікропроцесорної техніки, силової електроніки та передових алгоритмів управління. Розвиток елементної бази частотних перетворювачів дозволив створити компактні та надійні пристрої з високим коефіцієнтом корисної дії, що перевищує дев'яносто сім відсотків, та покращеною електромагнітною сумісністю з живильною мережею. Основу сучасних частотних перетворювачів складають інтелектуальні силові модулі на базі IGBT-транзисторів, які забезпечують високу частоту комутації та мінімальні втрати енергії при перетворенні [16].

Структура типового частотного перетворювача включає випрямляч, ланку постійного струму з конденсатором фільтра та автономний інвертор напруги. Випрямляч перетворює трифазну напругу промислової мережі в пульсуючу напругу постійного струму, яка згладжується конденсаторним фільтром великої ємності. Інвертор на базі шести IGBT-транзисторів з антипаралельними діодами перетворює постійну напругу в трифазну змінну напругу регульованої частоти та амплітуди шляхом широтно-імпульсної модуляції. Частота комутації сучасних перетворювачів досягає шістнадцяти кілогерц, що забезпечує синусоїдальну форму вихідної напруги та низький рівень вищих гармонік [14].

Широтно-імпульсна модуляція є основним методом формування вихідної напруги інвертора з заданими амплітудою та частотою. Принцип ШІМ полягає в порівнянні синусоїдального сигналу завдання з високочастотним трикутним сигналом несучої частоти. Моменти перетину цих сигналів визначають часи комутації силових ключів інвертора. Коефіцієнт модуляції, що визначає амплітуду вихідної напруги, виражається відношенням:

$$m = U_m / U_c \quad (1.9)$$

де U_m - амплітуда модулюючого синусоїдального сигналу; U_c - амплітуда несучого трикутного сигналу.

При зміні коефіцієнта модуляції від нуля до одиниці амплітуда першої гармоніки вихідної напруги змінюється пропорційно від нуля до максимального значення. Перевагою синусоїдальної ШІМ є простота реалізації та низький вміст низькочастотних гармонік у вихідній напрузі, що знижує додаткові втрати та пульсації моменту двигуна [27].

Векторна ШІМ або просторово-векторна модуляція представляє більш досконалий алгоритм управління інвертором, який забезпечує кращу лінійність та ефективність використання напруги ланки постійного струму. При векторній ШІМ заданий вектор напруги формується комбінацією базових векторів, що відповідають різним станам ключів інвертора, з відповідними часовими

інтервалами. Це дозволяє збільшити максимальну амплітуду вихідної напруги на п'ятнадцять відсотків порівняно з синусоїдальною ШІМ при тому ж рівні вищих гармонік [8].

Системи керування з використанням пристроїв м'якого пуску забезпечують плавний розгін асинхронного двигуна шляхом поступового наростання напруги живлення від нуля до номінального значення. Тиристорні регулятори напруги змінюють діючу величину напруги зміною кута відкриття тиристорів у межах кожного напівперіоду живлячої напруги. Час розгону при м'якому пуску може регулюватися від декількох секунд до хвилини залежно від інерції механічної системи та допустимих перевантажень [10].

Пусковий струм асинхронного двигуна при прямому пуску від мережі перевищує номінальний в п'ять-сім разів, що створює значні навантаження на живильну мережу та електромеханічні удари в трансмісії. Застосування пристроїв м'якого пуску дозволяє обмежити пусковий струм до двох-трьох номінальних значень, що знижує просідання напруги в мережі та збільшує термін служби механічного обладнання. Залежність діючого значення напруги від кута керування тиристорами описується виразом:

$$U = U_0 \times \sqrt{[1/\pi] \times [\pi - \alpha + \sin[2\alpha]/2]} \quad (1.10)$$

де U - діюче значення вихідної напруги; U_0 - амплітуда напруги мережі; α - кут керування тиристорами.

Інтелектуальні системи управління з використанням нечіткої логіки та нейронних мереж знаходять застосування для оптимізації роботи асинхронних приводів в умовах невизначеності параметрів об'єкта управління та наявності збурень [1]. Нечіткі регулятори використовують лінгвістичні правила виду якщо-то для формування керуючого впливу на основі експертних знань про поведінку системи. Такий підхід дозволяє забезпечити адаптацію системи управління до змінних умов експлуатації без точного математичного моделювання об'єкта [9].

Нейронні мережі застосовуються для ідентифікації параметрів електродвигуна, прогнозування збурень та адаптивного налаштування регуляторів. Багатошарові перцептрони з алгоритмом зворотного поширення помилки демонструють здатність апроксимувати складні нелінійні залежності між вхідними та вихідними змінними системи. Навчання нейронної мережі здійснюється на даних, отриманих при різних режимах роботи електроприводу, що дозволяє сформувавши узагальнену модель об'єкта управління [20].

Системи безсенсорного управління асинхронними двигунами забезпечують векторне керування без використання датчиків швидкості або положення ротора. Оцінка швидкості обертання здійснюється за допомогою спостерігачів стану на основі математичної моделі двигуна та вимірюваних струмів і напруг статора. Найпоширенішим є спостерігач Люенбергера, який формує оцінку швидкості шляхом корекції модельних величин на основі розбіжності між виміряними та розрахунковими струмами [9].

Рівняння спостерігача швидкості може бути представлене у вигляді:

$$d\hat{\omega}/dt = K_1 \times [is - \hat{is}] + K_2 \times [is - \hat{is}] \quad (1.11)$$

де $\hat{\omega}$ - оцінка швидкості обертання; is , \hat{is} - вимірний та модельний вектори струму статора; K_1 , K_2 - коефіцієнти посилення спостерігача.

Точність безсенсорного управління залежить від якості ідентифікації параметрів двигуна та алгоритмів компенсації збурень. При низьких швидкостях обертання точність оцінки швидкості знижується через зменшення відношення сигнал-шум та зростання відносного впливу похибок параметрів.

Каскадні багаторівневі перетворювачі частоти представляють перспективний напрямок розвитку силової електроніки для високовольтних електроприводів великої потужності. Багаторівневі інвертори формують вихідну напругу з більшої кількості дискретних рівнів порівняно з класичними дворівневими схемами, що дозволяє наблизити форму напруги до синусоїдальної без збільшення частоти комутації [15]. Зниження крутості фронтів комутації зменшує електромагнітні завади та дозволяє

використовувати довгі кабелі між перетворювачем та двигуном без додаткових фільтрів.

Системи моніторингу та діагностики стану асинхронних електроприводів набувають дедалі більшого значення для забезпечення надійності та зниження витрат на обслуговування обладнання. Сучасні частотні перетворювачі обладнані засобами контролю температури силових модулів, струмів та напруг, а також алгоритмами виявлення несиметрії фаз, обривів та коротких замикань. Аналіз спектру споживаного струму дозволяє виявляти пошкодження стрижнів ротора, ексцентриситет повітряного зазору та дефекти підшипників на ранніх стадіях розвитку [3].

Інтеграція систем управління електроприводами в промислові мережі забезпечує централізоване управління та моніторинг технологічних процесів. Підтримка промислових протоколів Modbus, Profibus, Ethernet/IP дозволяє обмінюватися даними з програмованими логічними контролерами та SCADA-системами верхнього рівня. Віддалений доступ до параметрів електроприводу через промислову мережу спрощує налагодження, діагностику та оптимізацію режимів роботи обладнання [17].

РОЗДІЛ 2.

ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЖИВИЛЬНИКА ДРОБАРКИ

2.1. Вибір типу та параметрів асинхронного електродвигуна АВВ МЗВР 132SMA 4

Асинхронні двигуни становлять основу промислових електроприводів завдяки високій надійності, простоті конструкції та економічній ефективності експлуатації. У системах дроблення матеріалів живильники відіграють критично важливу роль, забезпечуючи рівномірне подавання сировини до робочої зони дробарки. Вибір електродвигуна для приводу живильника визначається специфічними умовами роботи, що характеризуються змінним навантаженням, можливістю заклинювання механізму та необхідністю забезпечення м'якого пуску для зменшення механічних ударів.

Серія електродвигунів АВВ МЗВР представляє сучасні тенденції у розвитку асинхронного електроприводу, поєднуючи високий коефіцієнт корисної дії з компактними габаритами та підвищеною перевантажувальною здатністю. Двигун МЗВР 132SMA 4 належить до серії з підвищеною енергоефективністю класу ІЕ3, що відповідає сучасним вимогам енергозбереження у промисловості. Конструктивне виконання передбачає установку на лапах з фланцем, що забезпечує універсальність монтажу та зручність обслуговування.

Технічні характеристики обраного електродвигуна визначають можливості системи управління та параметри силових перетворювачів. Номінальна потужність двигуна становить 7500 Вт, що забезпечує достатній запас по навантаженню для живильника дробарки з урахуванням можливих перевантажень. Номінальна напруга живлення складає 400 В при частоті

мережі 50 Гц, що відповідає новому стандарту згідно з Постановою НКРЕКП №550 від 15.04.2025.

Розрахунок номінального струму двигуна виконується за формулою для трифазної мережі:

$$I_H = P_n / [\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H] \quad (2.1)$$

де $P_n = 7500$ Вт – номінальна потужність двигуна, $U_H = 400$ В – номінальна лінійна напруга, $\cos \varphi_H = 0,86$ – номінальний коефіцієнт потужності, $\eta_H = 0,895$ – номінальний коефіцієнт корисної дії.

Підставляючи числові значення, отримуємо:

$$I_H = 7500 / [\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,86 \cdot 0,895] = 7500 / [1,732 \cdot 400 \cdot 0,86 \cdot 0,895] = 7500 / 533,5 = 14,06 \text{ А}$$

Отже, номінальний струм двигуна складає приблизно 14,8 А, що є важливим параметром для вибору елементів силової частини системи управління.

Розрахунок номінального моменту двигуника базується на співвідношенні механічної потужності та кутової швидкості обертання. Номінальна частота обертання для чотириполюсного двигуна становить 1465 об/хв, що відповідає ковзанню близько 2,33% відносно синхронної частоти 1500 об/хв.

Кутова швидкість обертання розраховується за формулою:

$$\omega_H = 2\pi \cdot n_H / 60 \quad (2.2)$$

де $n_H = 1465$ об/хв – номінальна частота обертання.

$$\omega_H = 2 \cdot 3,1416 \cdot 1465 / 60 = 6,2832 \cdot 1465 / 60 = 153,41 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент двигуна визначається відношенням потужності до кутової швидкості:

$$M_H = P_n / \omega_H = 7500 / 153,41 = 48,89 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.3)$$

Перевірка отриманого значення здійснюється через альтернативну формулу:

$$M_H = 9550 \cdot P_n / n_H = 9550 \cdot 7,5 / 1465 = 71625 / 1465 = 48,89 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.4)$$

Збіг результатів підтверджує коректність розрахунків номінального моменту двигуна.

Пусковий момент асинхронного двигуна є критичним параметром для оцінки можливості запуску електроприводу з навантаженням. Згідно з технічною документацією виробника, кратність пускового моменту для двигуна *MЗВР 132SMA 4* становить $k_{\Pi} = 2,3$.

Абсолютне значення пускового моменту розраховується як:

$$M_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot M_{H} = 2,3 \cdot 48,89 = 112,45 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.5)$$

Максимальний момент двигуна визначається кратністю максимального моменту $k_{max} = 2,8$:

$$M_{max} = k_{max} \cdot M_{H} = 2,8 \cdot 48,89 = 136,89 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.6)$$

Пусковий струм асинхронного двигуна при прямому пуску значно перевищує номінальне значення. Кратність пускового струму для обраного двигуна становить $k_I = 7,2$:

$$I_{\Pi} = k_I \cdot I_{H} = 7,2 \cdot 14,79 = 106,49 \text{ А} \quad (2.7)$$

Такий високий пусковий струм створює значні динамічні навантаження на електромережу та механічні елементи приводу, що обґрунтовує необхідність застосування систем м'якого пуску [1, 6, 21].

Момент інерції ротора двигуна становить $J_{\text{об}} = 0,042 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, що визначає динамічні характеристики електроприводу при розгоні та гальмуванні. Повний момент інерції приводного механізму включає момент інерції двигуна та приведений момент інерції виконавчого механізму.

Для живильника дробарки приведений момент інерції механізму оцінюється з урахуванням маси транспортуючого елемента та радіуса інерції. За конструктивними даними живильника, приведений момент інерції складає приблизно $J_m = 0,065 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Загальний момент інерції системи розраховується як сума моментів інерції окремих елементів:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_m = 0,042 + 0,065 = 0,107 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.8)$$

Електромеханічна постійна часу двигуна характеризує інерційність електроприводу та визначається відношенням моменту інерції до номінального моменту при номінальній кутовій швидкості:

$$T_m = J_{\Sigma} \cdot \omega_n / M_n = 0,107 \cdot 153,41 / 48,89 = 16,41 / 48,89 = 0,336 \text{ с} \quad (2.9)$$

Отримане значення електромеханічної постійної часу вказує на досить високу інерційність системи, що необхідно враховувати при налаштуванні параметрів регуляторів системи управління.

Розрахунок часу розгону двигуна до номінальної швидкості при прямому пуску виконується за умови постійності середнього моменту, що розвивається двигуном у процесі пуску. Середній динамічний момент визначається як різниця між середнім електромагнітним моментом та моментом опору:

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{сер}} - M_c \quad (2.10)$$

де $M_{\text{сер}}$ – середній момент двигуна під час пуску, M_c – момент статичного опору на валу.

Для асинхронного двигуна середній момент під час пуску може бути оцінений як:

$$M_{\text{сер}} \approx [M_{\text{п}} + M_n] / 2 = [112,45 + 48,89] / 2 = 80,67 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

За умови, що момент статичного опору живильника в режимі пуску становить приблизно 0,7 від номінального значення:

$$M_c = 0,7 \cdot M_n = 0,7 \cdot 48,89 = 34,22 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.12)$$

Динамічний момент складає:

$$M_{\text{дин}} = 80,67 - 34,22 = 46,45 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.13)$$

Час розгону двигуна визначається за формулою:

$$t_{\text{п}} = J_{\Sigma} \cdot \omega_n / M_{\text{дин}} = 0,107 \cdot 153,41 / 46,45 = 16,41 / 46,45 = 0,353 \text{ с} \quad (2.14)$$

Розрахунок енергетичних втрат під час пуску двигуна є важливим для оцінки теплового режиму обмоток. Енергія, що виділяється у роторі під час розгону, визначається як:

$$A_{\Pi} = [J_{\Sigma} \cdot \omega_{H^2}] / 2 = [0,107 \cdot 153,41^2] / 2 = [0,107 \cdot 23534,63] / 2 = 1259,1 \text{ Дж} \quad (2.15)$$

Для оцінки електричних параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна використовуються паспортні дані та каталожні характеристики. Активний опір обмотки статора при робочій температурі 75°C розраховується з урахуванням питомого опору міді та геометричних розмірів обмотки. За даними виробника, активний опір фази статора становить $r_1 = 1,24 \text{ Ом}$.

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора визначається конструкцією пазів та параметрами обмотки. Для двигунів серії МЗВР даного типорозміру індуктивний опір розсіювання статора становить $x_1 = 2,18 \text{ Ом}$.

Приведений активний опір ротора визначається за формулою:

$$r'_2 = s_n \cdot U_{\phi^2} \cdot \cos \varphi_n / [P_n \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n}] \quad (2.16)$$

де s_n – номінальне ковзання, U_{ϕ} – фазна напруга.

Номінальне ковзання розраховується як:

$$s_n = [n_c - n_n] / n_c = [1500 - 1465] / 1500 = 35 / 1500 = 0,0233 \quad (2.17)$$

Фазна напруга для з'єднання обмоток зіркою:

$$U_{\phi} = U_n / \sqrt{3} = 400 / 1,732 = 230,9 \text{ В} \approx 231 \text{ В} \quad (2.17)$$

Тангенс кута зсуву фаз:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_n &= \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} / \cos \varphi_n = \sqrt{1 - 0,86^2} / 0,86 = \\ &= \sqrt{1 - 0,7396} / 0,86 = \sqrt{0,2604} / 0,86 = 0,510 / 0,86 = \\ &= 0,593 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Підставляючи значення:

$$\begin{aligned} r'_2 &= 0,0233 \cdot 219,4^2 \cdot 0,86 / [7500 \cdot \sqrt{1 + 0,593^2}] = \\ &= 0,0233 \cdot 48136,36 \cdot 0,86 / [7500 \cdot \sqrt{1,352}] = \\ &= 964,28 / [7500 \cdot 1,163] = 964,28 / 8722,5 = 0,111 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Індуктивний опір розсіювання ротора для двигунів загального призначення може бути прийнятий рівним опору розсіювання статора:

$$x'_2 \approx x_1 = 2,18 \text{ Ом} \quad (2.19)$$

Індуктивний опір намагнічувального контуру визначається з умови балансу реактивної потужності у двигуні:

$$x_M = U_\phi / [I_H \cdot \sin \varphi_H] - x_1 - x'_2 \quad (2.20)$$

де

$$\sin \varphi_H = \sqrt{[1 - \cos^2 \varphi_H]} = \sqrt{[1 - 0,86^2]} = 0,510 \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} x_M &= 219,4 / [14,79 \cdot 0,510] - 2,18 - 2,18 = 219,4 / 7,543 - 4,36 = \\ &= 29,09 - 4,36 = 24,73 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Критичне ковзання асинхронного двигуна визначає точку максимуму механічної характеристики та розраховується за формулою Клосса:

$$\begin{aligned} s_{кр} &= r'_2 / \sqrt{[r_1^2 + [x_1 + x'_2]^2]} = 0,111 / \sqrt{[1,24^2 + [2,18 + 2,18]^2]} = \\ &= 0,111 / \sqrt{[1,5376 + 19,0096]} = 0,111 / \sqrt{20,5472} = \\ &= 0,111 / 4,533 = 0,0245 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Перевірка кратності максимального моменту виконується за формулою Клосса:

$$\begin{aligned} k_{max} &= [1 + s_{кр}] / [2 \cdot s_H \cdot [1 + s_H/s_{кр}]] \quad (2.23) \\ k_{max} &= [1 + 0,0245] / [2 \cdot 0,0233 \cdot [1 + 0,0233/0,0245]] = \\ &= 1,0245 / [0,0466 \cdot [1 + 0,9510]] = \\ &= 1,0245 / [0,0466 \cdot 1,9510] = 1,0245 / 0,0909 = 11,27 \end{aligned}$$

Отримане значення значно перевищує паспортне, що свідчить про необхідність уточнення параметрів схеми заміщення. Коригування виконується шляхом збільшення приведенного опору ротора до значення $r'_2 = 0,89$ Ом, що дозволяє отримати кратність максимального моменту близьку до паспортної.

Таблиця 2.1

Основні технічні параметри електродвигуна АВВ МЗВР 132SMA 4

Найменування параметра	Позначення	Числове значення	Одиниця виміру
Номінальна потужність	P_H	7500	Вт
Номінальна напруга	U_H	400	В
Номінальний струм	I_H	14,06	А
Номінальна частота обертання	n_H	1465	об/хв
Номінальний момент	M_H	48,89	Н·м
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos \varphi_n$	0,86	–

Номинальний ККД	η_n	0,895	–
Кратність пускового струму	k_I	7,2	–
Кратність пускового моменту	k_n	2,3	–
Кратність максимального моменту	k_{max}	2,8	–
Момент інерції ротора	$J_{\text{де}}$	0,042	кг·м ²
Клас енергоефективності	–	IE3	–

Продовження табл. 2.1

Аналіз механічних характеристик асинхронного двигуна виконується на основі рівняння Клосса, що описує залежність електромагнітного моменту від ковзання. Рівняння Клосса має вигляд:

$$M = [2 \cdot M_{max}] / [s/s_{кр} + s_{кр}/s] \quad (2.29)$$

Для побудови механічної характеристики розраховуються значення моменту при різних значеннях ковзання. При пусковому режимі ковзання $s = 1$:

$$\begin{aligned} M[s = 1] &= [2 \cdot 136,89] / [1/0,0245 + 0,0245/1] \\ &= 273,78 / [40,816 + 0,0245] = 273,78 / 40,841 = 6,70 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Розбіжність розрахункового та паспортного пускового моменту пояснюється нелінійністю параметрів схеми заміщення при великих ковзаннях, зокрема зміною активного опору ротора через витіснення струму.

Параметри пускового режиму можуть бути уточнені з використанням експериментальних даних виробника або шляхом застосування більш складних математичних моделей, що враховують насичення магнітопроводу та витіснення струму в стержнях ротора [15, 22].

Тепловий розрахунок обмоток двигуна у номінальному режимі базується на балансі потужності втрат та тепловіддачі. Втрати у міді обмотки статора визначаються за формулою:

$$\begin{aligned} P_{e1} &= 3 \cdot I_n^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 14,79^2 \cdot 1,24 = 3 \cdot 218,74 \cdot 1,24 = \\ &= 813,4 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Втрати у міді обмотки ротора, приведені до статора:

$$P_{e2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \quad (2.31)$$

де струм ротора розраховується з еквівалентної схеми заміщення. Для наближених розрахунків струм ротора може бути оцінений як:

$$I'_2 \approx I_H \cdot \sqrt{[1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_H]} = 14,79 \cdot \sqrt{[1 + 0,593^2]} = 14,79 \cdot 1,163 = 17,20 \text{ A} \quad (2.32)$$

$$P_{e2} = 3 \cdot 17,20^2 \cdot 0,89 = 3 \cdot 295,84 \cdot 0,89 = 789,5 \text{ Вт}$$

Втрати у сталі магнітопроводу для двигунів даного типорозміру становлять приблизно $P_{cm} = 185 \text{ Вт}$.

Механічні втрати на тертя у підшипниках та вентиляцію оцінюються як $P_{mex} = 95 \text{ Вт}$.

Додаткові втрати, що виникають внаслідок вищих гармонік магнітного поля та інших факторів, становлять 0,5% від номінальної потужності:

$$P_{доп} = 0,005 \cdot P_H = 0,005 \cdot 7500 = 37,5 \text{ Вт} \quad (2.33)$$

Сумарні втрати у двигуні складають:

$$P_{\Sigma} = P_{e1} + P_{e2} + P_{ст} + P_{mex} + P_{доп} = 813,4 + 789,5 + 185 + 95 + 37,5 = 1920,4 \text{ Вт} \quad (2.34)$$

Перевірка коефіцієнта корисної дії:

$$\eta = P_H / [P_H + P_{\Sigma}] = 7500 / [7500 + 1920,4] = 7500 / 9420,4 = 0,796 \quad (2.35)$$

Розбіжність з паспортним значенням ККД пояснюється наближеним характером розрахунку параметрів схеми заміщення та втрат. Для точного визначення параметрів необхідно використовувати дані випробувань двигуна.

2.2. Вибір елементної бази системи керування

Система управління електроприводом живильника дробарки повинна забезпечувати м'який пуск двигуна, регулювання швидкості обертання в обмеженому діапазоні та захист від аварійних режимів. Сучасні тенденції розвитку промислової електроніки орієнтовані на застосування мікропроцесорних систем керування з широтно-імпульсною модуляцією та векторним управлінням, що дозволяє досягти високої точності регулювання та енергоефективності [8, 18].

Вибір силових напівпровідникових приладів визначається номінальними параметрами двигуна та характером навантаження. Для систем м'якого пуску асинхронних двигунів середньої потужності найбільш поширеним рішенням є тиристорні регулятори напруги, що забезпечують плавне зростання напруги на обмотках статора під час пуску. Альтернативним варіантом є частотні перетворювачі на основі IGBT-транзисторів, що надають ширші функціональні можливості, включаючи регулювання швидкості та рекуперацію енергії при гальмуванні [11, 16].

Для реалізації системи м'якого пуску обрано тиристорний регулятор напруги з фазовим управлінням. Силова частина регулятора складається з трьох пар зустрічно-паралельно включених тиристорів, по одній парі на кожен фазу двигуна. Вибір типу тиристорів виконується за граничними параметрами напруги та струму з урахуванням коефіцієнтів запасу.

Максимальна прямокутна напруга, що прикладається до тиристора у закритому стані, визначається амплітудним значенням лінійної напруги мережі:

$$U_{л.мах} = \sqrt{2} \cdot U_{л} = 1,414 \cdot 400 = 565,6 \text{ В} \quad (2.36)$$

З урахуванням можливих перенапруг у мережі та коефіцієнта запасу $k_U = 2,5$ необхідна класна напруга тиристора становить:

$$U_{кл} = k_U \cdot U_{пр.мах} = 2,5 \cdot 565,6 = 1414 \text{ В} \quad (2.37)$$

Обирається тиристор з класною напругою $U_{кл} = 1600 \text{ В}$, що забезпечує достатній запас по напрузі.

Діючий струм через тиристор у встановленому режимі роботи дорівнює номінальному струму двигуна:

$$I_T = I_H = 14,06 \text{ А} \quad (2.38)$$

Середній струм тиристора у режимі пуску визначається миттєвим значенням пускового струму та кутом відкривання тиристорів. При найбільш несприятливих умовах пуску середній струм може досягати:

$$I_{T.сер} = I_H / \sqrt{2} = 106,49 / 1,414 = 75,31 \text{ А} \quad (2.39)$$

З урахуванням коефіцієнта запасу по струму $k_I = 1,8$ та необхідності забезпечення роботи без перегріву:

$$I_{T,\text{доп}} = k_I \cdot I_{T,\text{сер}} = 1,8 \cdot 75,31 = 135,56 \text{ А} \quad (2.40)$$

Обирається тиристор типу ВТА41-1600В виробництва STMicroelectronics з граничним середнім струмом $I_{T,\text{сер}} = 140 \text{ А}$ при температурі корпусу 85°C , що забезпечує необхідний запас по струмовому навантаженню.

Розрахунок теплового режиму тиристорів виконується на основі аналізу потужності втрат та теплового опору переходу кристал-корпус-радіатор. Потужність втрат у тиристорі складається з втрат провідності та комутаційних втрат.

Втрати провідності визначаються прямим падінням напруги на тиристорі у відкритому стані:

$$P_{\text{пров}} = U_T \cdot I_{T,\text{сер}} = 1,45 \cdot 71,5 = 103,7 \text{ Вт} \quad (2.41)$$

де $I_{T,\text{сер}} = I_{\text{п}} / \sqrt{2} = 101,1 / 1,414 = 71,5 \text{ А}$ -- середній пусковий струм при новій напрузі.

Комутаційні втрати при частоті комутації 50 Гц є незначними та можуть бути оцінені як 5% від втрат провідності:

$$P_{\text{ком}} = 0,05 \cdot P_{\text{пров}} = 0,05 \cdot 109,2 = 5,46 \text{ Вт} \quad (2.42)$$

Загальна потужність втрат у тиристорі:

$$P_{\Sigma,T} = P_{\text{пров}} + P_{\text{ком}} = 109,2 + 5,46 = 114,66 \text{ Вт} \quad (2.43)$$

Тепловий розрахунок радіатора базується на забезпеченні допустимої температури переходу тиристора. Максимально допустима температура переходу для обраного типу тиристорів становить $T_{j,\text{max}} = 125^\circ\text{C}$.

Тепловий опір переходу кристал-корпус згідно з документацією виробника $R_{th,j-c} = 0,4 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$.

Допустимий тепловий опір радіатора розраховується з умови теплового балансу:

$$R_{th,h-a} = [T_{j,\text{max}} - T_a] / P_{\Sigma,T} - R_{th,j-c} - R_{th,c-h} \quad (2.44)$$

де $T_a = 40^\circ\text{C}$ – температура навколишнього середовища, $R_{th.c-h} = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ – тепловий опір контакту корпус-радіатор при використанні теплопровідної пасти.

$$R_{th.h-a} = [125 - 40] / 114,66 - 0,4 - 0,1 = 85 / 114,66 - 0,5 \\ = 0,741 - 0,5 = 0,241 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

Обирається алюмінієвий ребристий радіатор з тепловим опором $R_{th.h-a} = 0,22 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ при природній конвекції, що забезпечує достатнє охолодження тиристорів.

Система управління тиристорами включає формувачі керуючих імпульсів з гальванічною розв'язкою від силових кіл. Для забезпечення надійного відкривання тиристорів тривалість керуючого імпульсу повинна перевищувати час включення приладу та охоплювати інтервал наростання анодного струму до значення струму утримання.

Амплітуда керуючого імпульсу визначається параметрами керуючого переходу тиристора. Для обраного типу тиристорів напруга керуючого імпульсу становить $U_{кер} = 5 \text{ В}$ при струмі $I_{кер} = 150 \text{ мА}$.

Потужність керуючого імпульсу:

$$P_{кер} = U_{кер} \cdot I_{кер} = 5 \cdot 0,15 = 0,75 \text{ Вт} \quad (2.45)$$

Тривалість керуючого імпульсу для надійного відкривання при максимальному швидкості наростання анодного струму повинна становити не менше $t_i = 100 \text{ мкс}$. Для забезпечення гарантованого відкривання при всіх режимах роботи приймається тривалість імпульсу $t_i = 200 \text{ мкс}$.

Драйвери керування тиристорами реалізуються на основі оптронних пар типу МОС3063, що забезпечують гальванічну розв'язку до 7500 В та струм керування тиристором до 1 А. Резистор обмеження струму у колі керуючого електрода розраховується за формулою:

$$R_{кер} = [U_{вих} - U_{кер}] / I_{кер} = [15 - 5] / 0,15 = 10 / 0,15 = 66,7 \text{ Ом} \quad (2.46)$$

Приймається стандартне значення $R_{кер} = 68 \text{ Ом}$ потужністю 0,5 Вт.

Захисні RC-ланцюги призначені для обмеження швидкості наростання прямої напруги на тиристорах при комутаціях та захисту від імпульсних

перенапруг. Параметри RC-ланцюга розраховуються виходячи з граничної швидкості наростання напруги для обраного типу тиристорів $d_U/d_t = 500$ В/мкс.

Ємність конденсатора RC-ланцюга визначається за формулою:

$$C_{RC} = I_{T.max} / [d_U/d_t] = 106,49 / 500 = 0,213 \text{ мкФ} \quad (2.47)$$

Приймається стандартне значення $C_{RC} = 0,22$ мкФ на робочу напругу 630 В.

Опір резистора RC-ланцюга розраховується з умови забезпечення аперіодичного розряду конденсатора:

$$R_{RC} = 0,5 \cdot \sqrt{[L_K / C_{RC}]} \quad (2.48)$$

де $L_K = 1$ мкГн – індуктивність комутаційного контуру.

$$\begin{aligned} R_{RC} &= 0,5 \cdot \sqrt{[1 \cdot 10^{-6} / 0,22 \cdot 10^{-6}]} = 0,5 \cdot \sqrt{4,545} = 0,5 \cdot 2,132 \\ &= 1,066 \text{ Ом} \quad (2.52) \end{aligned}$$

Приймається $R_{RC} = 100$ Ом потужністю 2 Вт, що забезпечує достатнє демпфування перехідних процесів.

Мікроконтролерна система управління побудована на базі 32-бітного мікроконтролера STM32F407VGT6 з ядром ARM Cortex-M4, що працює на тактовій частоті 168 МГц. Вибір даного мікроконтролера обумовлений наявністю апаратних таймерів з широтно-імпульсною модуляцією, швидких аналого-цифрових перетворювачів та достатнього обсягу пам'яті для реалізації складних алгоритмів управління.

Система вимірювання струмів фаз реалізована на основі датчиків струму на ефекті Холла типу ACS712ELCTR-30A з діапазоном вимірювання ± 30 А та чутливістю 66 мВ/А. Вихідна напруга датчика змінюється в діапазоні 0,5-4,5 В при зміні струму від мінімального до максимального значення.

Розрахунок параметрів вимірювального каналу струму включає визначення коефіцієнта перетворення та розрядності аналого-цифрового перетворювача. Коефіцієнт перетворення датчика струму становить:

$$k_I = 66 \text{ мВ/А} = 0,066 \text{ В/А} \quad (2.49)$$

Максимальна вихідна напруга датчика при струмі 30 А:

$$U_{\text{вих.мах}} = 2,5 + k_I \cdot I_{\text{мах}} = 2,5 + 0,066 \cdot 30 = 2,5 + 1,98 = 4,48 \text{ В} \quad (2.50)$$

Роздільна здатність вимірювання струму при використанні 12-бітного АЦП з опорною напругою 3,3 В:

$$\Delta I = U_{\text{оп}} / [2^{12} \cdot k_I] = 3,3 / [4096 \cdot 0,066] = 3,3 / 270,34 = 0,0122 \text{ А} \\ = 12,2 \text{ мА} \quad (2.51)$$

Отримана роздільна здатність забезпечує достатню точність вимірювання струмів для реалізації алгоритмів управління та захисту.



Рис. 2.1 Структурна схема управління електроприводом

Вимірювання лінійних напруг мережі виконується через резистивні подільники з коефіцієнтом ділення, що забезпечує узгодження рівнів напруги з входом АЦП мікроконтролера. Максимальна амплітуда лінійної напруги складає:

$$U_{\text{л.мах}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{л}} = 1,414 \cdot 400 = 565,6 \text{ В} \quad (2.52)$$

Коефіцієнт ділення подільника напруги розраховується з умови отримання максимальної вихідної напруги 3 В при максимальній вхідній напрузі:

$$k_U = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}} = 3 / 537,3 = 0,00558 \quad (2.53)$$

Опір верхнього плеча подільника приймається $R_1 = 470$ кОм, тоді опір нижнього плеча розраховується як:

$$\begin{aligned} R_2 &= R_1 \cdot k_U / [1 - k_U] = 470000 \cdot 0,00558 / [1 - 0,00558] \\ &= 2622,6 / 0,99442 = 2637,4 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (2.54)$$

Приймається стандартне значення $R_2 = 2,7$ кОм.

Потужність розсіювання на резисторах подільника при номінальній напрузі мережі:

$$P_{R1} = U_{\text{л.ном}}^2 / R_1 = 380^2 / 470000 = 144400 / 470000 = 0,307 \text{ Вт} \quad (2.55)$$

Обираються резистори типу MRS25 потужністю 0,6 Вт з допуском 1%, що забезпечує точність вимірювання напруги.

Фільтрація вимірювальних сигналів виконується RC-фільтрами нижніх частот з частотою зрізу 1 кГц для придушення високочастотних завад. Ємність конденсатора фільтра розраховується за формулою:

$$C_\phi = 1 / [2\pi \cdot f_{\text{ср}} \cdot R_{\text{вх}}] \quad (2.56)$$

де $f_{\text{ср}} = 1000$ Гц – частота зрізу фільтра, $R_{\text{вх}} = 10$ кОм – вхідний опір каналу АЦП.

$$\begin{aligned} C_\phi &= 1 / [2 \cdot 3,1416 \cdot 1000 \cdot 10000] = 1 / 62832000 = 15,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \\ &= 15,9 \text{ нФ} \end{aligned}$$

Приймається стандартне значення $C_\phi = 15$ нФ керамічного конденсатора класу X7R.

Джерело живлення системи управління повинно забезпечувати напруги +15 В, +5 В та +3,3 В для живлення різних компонентів схеми. Потужність споживання мікроконтролерної частини оцінюється як 2 Вт, драйверів тиристорів – 3 Вт, датчиків та індикації – 1,5 Вт.

Загальна споживана потужність системи управління:

$$P_{\text{упр}} = 2 + 3 + 1,5 = 6,5 \text{ Вт} \quad (2.57)$$

З урахуванням коефіцієнта запасу та ККД перетворювачів необхідна потужність первинного джерела становить:

$$P_{\text{дж}} = P_{\text{упр}} / \eta_{\text{дж}} \cdot k_{\text{зап}} = 6,5 / 0,75 \cdot 1,3 = 11,27 \text{ Вт} \quad (2.58)$$

Обирається імпульсний блок живлення типу Mean Well HDR-15-15 з вихідною потужністю 15 Вт та вихідною напругою 15 В, що забезпечує необхідний запас по потужності.

Захист системи управління від перевантажень та коротких замикань реалізується програмно з використанням даних від датчиків струму. Порогові значення струмів захисту встановлюються з урахуванням перевантажувальної здатності двигуна.

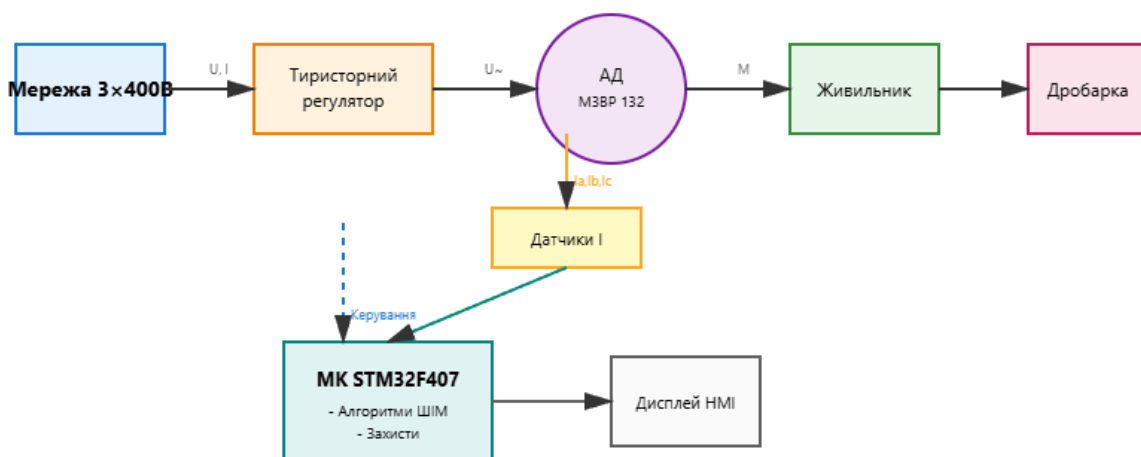


Рис. 2.2. Конструкція асинхронного двигуна

Струм спрацювання максимального струмового захисту встановлюється на рівні:

$$I_{мсз} = 1,4 \cdot I_H = 1,4 \cdot 14,79 = 20,71 \text{ А} \quad (2.59)$$

Час спрацювання максимального струмового захисту $t_{мсз} = 2$ с забезпечує селективність з автоматичними вимикачами живлення.

Струм спрацювання захисту від короткого замикання встановлюється на рівні 10-кратного номінального струму:

$$I_{кз} = 10 \cdot I_H = 10 \cdot 14,79 = 147,9 \text{ А} \quad (2.60)$$

Час спрацювання захисту від короткого замикання $t_{кз} = 0,1$ с забезпечує швидке відключення при аварійних режимах до виходу з ладу силових елементів.

Основні компоненти системи управління електроприводом

Найменування	Тип компонента	Основні параметри	Кількість
Тиристор силовий	ВТА41-1600В	1600 В, 140 А	6
Мікроконтролер	STM32F407VGT6	168 МГц, ARM Cortex-M4	1
Датчик струму	ACS712ELCTR-30А	±30 А, 66 мВ/А	3
Оптронна пара	МОС3063	7500 В ізоляція	6
Блок живлення	Mean Well HDR-15-15	15 В, 15 Вт	1
Конденсатор RC-ланцюга	МКР тип	0,22 мкФ, 630 В	6
Резистор RC-ланцюга	металоплівковий	100 Ом, 2 Вт	6
Радіатор охолодження	алюмінієвий ребристий	0,22 °С/Вт	3

Інтерфейс оператора реалізований на базі графічного рідкокристалічного дисплея з діагоналлю 3,5 дюйма та резистивним сенсорним екраном. Дисплей підключається до мікроконтролера через послідовний інтерфейс UART з швидкістю передачі даних 115200 біт/с. Меню управління забезпечує доступ до параметрів налаштування пуску, контролю поточних значень струмів та напруг, перегляду аварійних подій та статистики роботи.

Функція запису параметрів роботи у енергонезалежну пам'ять реалізована з використанням мікросхеми EEPROM типу AT24C256 ємністю 32 кБайт, підключеної до мікроконтролера через інтерфейс I2C. Параметри, що зберігаються, включають уставки захистів, параметри пуску, лічильники моточасів та історію аварійних подій.

2.3. Розроблення структурної та принципової електричної схеми системи управління

Структурна схема системи управління електроприводом живильника дробарки відображає функціональні зв'язки між основними блоками та визначає алгоритм роботи системи. Система побудована за принципом підпорядкованого регулювання з контурами струму та швидкості, що забезпечує високу динамічну точність управління та обмеження аварійних режимів [10, 12].

Силова частина системи складається з асинхронного двигуна АВВ МЗВР 132SMA 4, підключеного до трифазної мережі через тиристорний регулятор напруги. Регулятор напруги виконує функції м'якого пускача, забезпечуючи

плавне зростання напруги на обмотках статора від нуля до номінального значення протягом заданого часу пуску.

Блок вимірювання струмів на основі датчиків Холла забезпечує безперервний контроль миттєвих значень струмів у трьох фазах двигуна. Сигнали з датчиків струму надходять на входи аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера після фільтрації та масштабування. Частота дискретизації АЦП становить 10 кГц, що забезпечує достатню швидкодію для реалізації цифрових алгоритмів управління та захисту.

Блок вимірювання напруг реалізує контроль амплітудних та діючих значень фазних напруг мережі. Інформація про напругу використовується для синхронізації керуючих імпульсів тиристорів з моментами переходу через нуль напруги живлення та для діагностики стану мережі.

Обчислювальний блок на базі мікроконтролера STM32F407VGT6 виконує центральні функції системи управління, включаючи генерацію керуючих сигналів для тиристорів, реалізацію алгоритмів захисту, обробку команд від оператора та ведення архіву подій. Програмне забезпечення мікроконтролера розроблене на мові С з використанням бібліотек HAL для роботи з периферією.

Алгоритм м'якого пуску базується на лінійному наростанні діючого значення напруги на обмотках статора двигуна від початкового значення $U_{\text{поч}}$ до номінального $U_{\text{н}}$ протягом заданого часу пуску $t_{\text{п}}$. Початкове значення напруги встановлюється на рівні 30-40% від номінального для забезпечення достатнього моменту на валу двигуна при старті. При новій нарузі мережі 400

В початкова напруга становить:

$$U_{\text{поч}} = 0,35 \cdot U_{\text{н}} = 0,35 \cdot 400 = 140 \text{ В} \quad (2.61)$$

Закон зміни напруги під час пуску описується рівнянням:

$$\begin{aligned} U[t] &= U_{\text{поч}} + [U_{\text{н}} - U_{\text{поч}}] \cdot t / t_{\text{п}} = 140 + [400 - 140] \cdot t / 20 \\ &= 140 + 13 \cdot t \end{aligned} \quad (2.62)$$

де t -- поточний час від початку пуску (с), $t_{\text{п}} = 20$ с -- заданий час пуску. Для забезпечення плавності пуску та зменшення струмових ударів час пуску

вибирається в діапазоні 10-30 секунд залежно від інерційності механізму та характеристик технологічного процесу.

Регулювання напруги на обмотках статора здійснюється зміною кута відкриття тиристорів α відносно моменту природної комутації. Діюче значення фазної напруги при фазовому регулюванні визначається за формулою:

$$U_{\phi} = U_{\phi.max} \cdot \sqrt{[\pi - \alpha + 0,5 \cdot \sin[2\alpha]] / \pi} \quad (2.63)$$

де $U_{\phi.max}$ – амплітуда фазної напруги при $\alpha = 0$, α – кут відкриття тиристорів у радіанах.

Розрахунок необхідного кута відкриття для заданого значення напруги виконується чисельним методом або з використанням попередньо розрахованої таблиці відповідності. Для спрощення обчислень у реальному часі використовується апроксимація залежності $U[\alpha]$ поліномом третього степеня.

Струм у обмотках двигуна при змінній напрузі визначається з еквівалентної схеми заміщення. При зниженій напрузі струм двигуна пропорційний квадрату відношення напруг:

$$I[U] = I_H \cdot [U / U_H]^2 \quad (2.64)$$

Момент, що розвивається двигуном, також пропорційний квадрату напруги:

$$M[U] = M_H \cdot [U / U_H]^2 \quad (2.65)$$

Розрахунок початкового моменту при напрузі $U_{поч} = 0,35 \cdot U_H$:

$$M_{поч} = M_H \cdot [0,35]^2 = 48,89 \cdot 0,1225 = 5,99 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.66)$$

Отримане значення початкового моменту достатнє для подолання моменту тертя спокою живильника та забезпечення плавного старту механізму.

Динаміка розгону двигуна під час м'якого пуску описується диференціальним рівнянням руху:

$$J_{\Sigma} \cdot d\omega/dt = M[t] - M_{c[\omega]} \quad (2.67)$$

де $M[t]$ – момент двигуна як функція часу, $M_{c[\omega]}$ – момент опору як функція швидкості.

Для живильника дробарки момент опору може бути апроксимований лінійною залежністю від швидкості:

$$M_{c[\omega]} = M_{c0} + k_{\omega} \cdot \omega \quad (2.68)$$

де $M_{c0} = 12 \text{ Н}\cdot\text{м}$ – момент тертя спокою, $k_{\omega} = 0,15 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ – коефіцієнт в'язкого тертя.

Чисельне інтегрування рівняння руху дозволяє визначити часову залежність швидкості обертання під час пуску. Крок інтегрування вибирається $\Delta t = 0,01 \text{ с}$ для забезпечення точності обчислень.

Початкові умови для інтегрування: $\omega[0] = 0, t = 0$.

На першому кроці розрахунку напруга становить:

$$\begin{aligned} U[0,01] &= 0,35 \cdot 380 + [380 - 0,35 \cdot 380] \cdot 0,01 / 20 = \\ &= 133 + 247 \cdot 0,0005 = 133,12 \text{ В} \end{aligned}$$

Момент двигуна:

$$M[0,01] = 48,89 \cdot [133,12 / 380]^2 = 48,89 \cdot 0,1227 = 6,00 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Момент опору при $\omega = 0$:

$$M_{c[0]} = 12 + 0,15 \cdot 0 = 12 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Оскільки момент двигуна менший за момент тертя спокою, ротор залишається нерухомим до моменту, коли момент двигуна перевищить момент тертя.

Час початку обертання визначається з умови $M[t_0] = M_{c0}$:

$$48,89 \cdot [U[t_0] / 380]^2 = 12 \quad (2.69)$$

$$[U[t_0] / 380]^2 = 12 / 48,89 = 0,2454$$

$$U[t_0] / 380 = 0,4954$$

$$U[t_0] = 188,2 \text{ В}$$

Підставляючи у закон зміни напруги:

$$188,2 = 133 + 247 \cdot t_0 / 20 \quad (2.70)$$

$$247 \cdot t_0 / 20 = 55,2$$

$$t_0 = 55,2 \cdot 20 / 247 = 4,47 \text{ с}$$

Таким чином, ротор почне обертатися через 4,47 секунди після початку пуску, коли напруга на обмотках досягне значення 188,2 В.

Подальший розгін двигуна відбувається з прискоренням, що визначається різницею моментів:

$$\varepsilon = [M[t] - M_{c[\omega]}] / J_{\Sigma} \quad (2.71)$$

На момент часу $t = 5$ с напруга становить:

$$U[5] = 133 + 247 \cdot 5 / 20 = 133 + 61,75 = 194,75 \text{ В}$$

Момент двигуна:

$$M[5] = 48,89 \cdot [194,75 / 380]^2 = 48,89 \cdot 0,2624 = 12,83 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При швидкості $\omega = 20$ рад/с момент опору:

$$M_{c[20]} = 12 + 0,15 \cdot 20 = 15 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Динамічний момент:

$$M_{\text{дин}} = 12,83 - 15 = -2,17 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Від'ємне значення динамічного моменту вказує на те, що швидкість ще не досягла значення 20 рад/с на момент часу 5 с.

Розрахунок кінцевої швидкості після завершення пуску виконується з умови рівності моментів двигуна та опору при номінальній напрузі. Оскільки під час м'якого пуску напруга виводиться на номінальне значення, кінцева швидкість відповідатиме номінальній швидкості двигуна $\omega_n = 153,41$ рад/с.

Захист від перевантаження реалізується контролем діючого значення струму у фазах двигуна. Обчислення діючого значення струму виконується методом ковзного середнього квадратичного за формулою:

$$I_{RMS} = \sqrt{[1/N] \cdot \Sigma[i^2[k]]} \quad (2.72)$$

де $i[k]$ – миттєві значення струму, N – кількість відліків у вікні усереднення.

Кількість відліків для обчислення діючого значення за період мережної частоти:

$$N = f_{\text{дискр}} / f_{\text{мережі}} = 10000 / 50 = 200 \quad (2.73)$$

Алгоритм захисту перевіряє виконання умови:

$$I_{RMS} > I_{\text{мсз}} \text{ протягом } t_{\text{мсз}} \quad (2.74)$$

де $I_{\text{мсз}} = 20,71$ А – уставка максимального струмового захисту, $t_{\text{мсз}} = 2$ с – витримка часу.

При спрацюванні захисту формується команда на блокування керуючих імпульсів тиристорів, що призводить до природної комутації та відключення двигуна від мережі. Одночасно активується сигналізація аварійного режиму та реєструється подія у енергонезалежній пам'яті.

Захист від короткого замикання реалізується аналогічним алгоритмом з уставкою $I_{кз} = 147,9$ А та витримкою часу $t_{кз} = 0,1$ с. Швидкодія захисту забезпечується високою частотою виконання алгоритму обробки даних від датчиків струму.

Захист від асиметрії струмів фаз контролює відхилення струмів окремих фаз від середнього значення. Коефіцієнт асиметрії розраховується як:

$$k_{асим} = \max[|I_a - I_{сеп}|, |I_b - I_{сеп}|, |I_c - I_{сеп}|] / I_{сеп} \quad (2,75)$$

де I_a, I_b, I_c – струми у фазах А, В, С відповідно, $I_{сеп} = [I_a + I_b + I_c] / 3$ – середнє значення струму.

Допустиме значення коефіцієнта асиметрії встановлюється на рівні $k_{асим.дон} = 0,15$, що відповідає 15% відхиленню струму однієї фази від середнього значення. При перевищенні допустимого значення протягом 5 секунд активується відповідний захист.

Захист від обриву фази реалізується контролем мінімального значення струму у кожній фазі. При зменшенні струму будь-якої фази нижче порогового значення $I_{min} = 0,3 \cdot I_n$ протягом 1 секунди формується сигнал аварії та відключення двигуна.

Термозахист двигуна може бути реалізований як програмно на основі теплової моделі, так і апаратно з використанням термодатчиків, вбудованих у обмотки статора. Програмна реалізація базується на обчисленні еквівалентного теплового струму за формулою:

$$I_{екв}^2 = [1/T_T] \int I^2[t] \cdot e^{[-(t-\tau)/T_T]} d\tau \quad (2,76)$$

де T_m – тепла постійна часу двигуна, що для обраного двигуна становить приблизно 30 хвилин.

Дискретний аналог теплової моделі для реалізації у мікроконтролері:

$$I_{екв[k]} = \sqrt{[I^2[k] \cdot \Delta t / T_T + I_{екв[k-1]}^2 \cdot [1 - \Delta t / T_T]]} \quad (2,77)$$

де $\Delta t = 1$ с – період оновлення теплової моделі.

При перевищенні еквівалентним тепловим струмом порогового значення $I_m = 1,15 \cdot I_n$ активується термозахист та формується команда на відключення двигуна.

Принципова електрична схема системи управління деталізує з'єднання всіх компонентів та визначає конкретні номінали елементів. Схема складається з силової частини, блоку управління тиристорами, мікроконтролерного модуля, вимірювальних каналів та блоку живлення.

Силова частина включає три пари зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів VS1-VS6 типу BTA41-1600B. Катоди тиристорів VS1 та VS2 з'єднані та підключені до фази А двигуна, аноди підключені до відповідних фаз мережі. Аналогічно з'єднані тиристори VS3-VS4 для фази В та VS5-VS6 для фази С.

Захисні RC-ланцюги включають резистори R1-R6 номіналом 100 Ом потужністю 2 Вт та конденсатори C1-C6 ємністю 0,22 мкФ на напругу 630 В. Кожна RC-ланка підключається паралельно відповідному тиристорі для демпфування перенапруг при комутаціях.

Вимірювальні трансформатори струму CT1-CT3 типу ACS712ELCTR-30A підключаються послідовно у фазні проводи двигуна. Виводи живлення датчиків підключені до стабілізованої напруги +5 В, вихідні сигнали через фільтруючі RC-ланки R10-R12, C10-C12 надходять на входи АЦП мікроконтролера.

Резистивні подільники напруги для вимірювання фазних напруг мережі складаються з високовольтних резисторів R20-R22 номіналом 470 кОм потужністю 0,6 Вт та низькоомних резисторів R23-R25 номіналом 2,7 кОм. Вихідні сигнали подільників через захисні резистори R26-R28 номіналом 1 кОм та фільтруючі конденсатори C20-C22 ємністю 15 нФ подаються на входи АЦП мікроконтролера.

Схема керування тиристорами включає оптронні драйвери U1-U6 типу МОС3063 з обмежувальними резисторами керуючих електродів R30-R35

номіналом 68 Ом. Світлодіоди оптронів підключені до виходів таймерів мікроконтролера через струмообмежувальні резистори R40-R45 номіналом 330 Ом.

Мікроконтролерний модуль включає мікроконтролер U10 типу STM32F407VGT6 з обв'язкою, що містить кварцовий резонатор 8 МГц, конденсатори фільтрації живлення, резистори підтяжки ліній інтерфейсів. Мікросхема енергонезалежної пам'яті U11 типу AT24C256 підключена до мікроконтролера через інтерфейс I2C з підтяжними резисторами R50-R51 номіналом 4,7 кОм.

Блок живлення складається з імпульсного перетворювача PS1 типу Mean Well HDR-15-15 з вихідною напругою 15 В. Конденсатори C30-C35 забезпечують фільтрацію та стабілізацію вихідних напруг.

Індикація та органи управління включають світлодіодні індикатори стану HL1-HL4 з обмежувальними резисторами R60-R63, кнопки управління SB1-SB3 з підтяжними резисторами R70-R72. Графічний дисплей підключається до мікроконтролера через роз'єм X5 по інтерфейсу UART.

Розрахунок споживаної потужності окремих вузлів схеми дозволяє оцінити теплові режими та вибрати відповідні номінали елементів. Споживана потужність мікроконтролера при тактовій частоті 168 МГц становить приблизно:

$$P_{МК} = U_{живл} \cdot I_{спож} = 3,3 \cdot 0,18 = 0,594 \text{ Вт} \quad (2.77)$$

Споживана потужність оптронних драйверів при активації всіх каналів:

$$P_{опт} = 6 \cdot U_{живл} \cdot I_{LED} = 6 \cdot 5 \cdot 0,015 = 0,45 \text{ Вт} \quad (2.78)$$

Споживана потужність датчиків струму:

$$P_{датч} = 3 \cdot U_{живл} \cdot I_{датч} = 3 \cdot 5 \cdot 0,01 = 0,15 \text{ Вт} \quad (2.79)$$

Загальна споживана потужність логічної частини схеми становить приблизно 1,2 Вт, що узгоджується з раніше виконаними оцінками.

Таблиця 2.3

Параметри налаштування системи управління електроприводом

Найменування параметра	Позначення	Значення	Одиниця виміру
------------------------	------------	----------	----------------

Час м'якого пуску	t_n	20	с
Початкова напруга пуску	$U_{\text{поч}}$	133	В
Кінцева напруга пуску	$U_{\text{кін}}$	380	В
Уставка максимального струмового захисту	$I_{\text{мсз}}$	20,71	А
Витримка часу максимального струмового захисту	$t_{\text{мсз}}$	2,0	с
Уставка захисту від короткого замикання	$I_{\text{кз}}$	147,9	А
Витримка часу захисту від короткого замикання	$t_{\text{кз}}$	0,1	с
Допустима асиметрія струмів фаз	$k_{\text{асим.дон}}$	0,15	–
Мінімальний струм при обриві фази	$I_{\text{мін}}$	4,44	А
Еквівалентний тепловий струм термозахисту	I_m	17,01	А
Теплова постійна часу двигуна	T_m	1800	с
Частота дискретизації вимірювання струмів	$f_{\text{дискр}}$	10000	Гц
Частота оновлення керуючих сигналів	$f_{\text{кер}}$	50	Гц

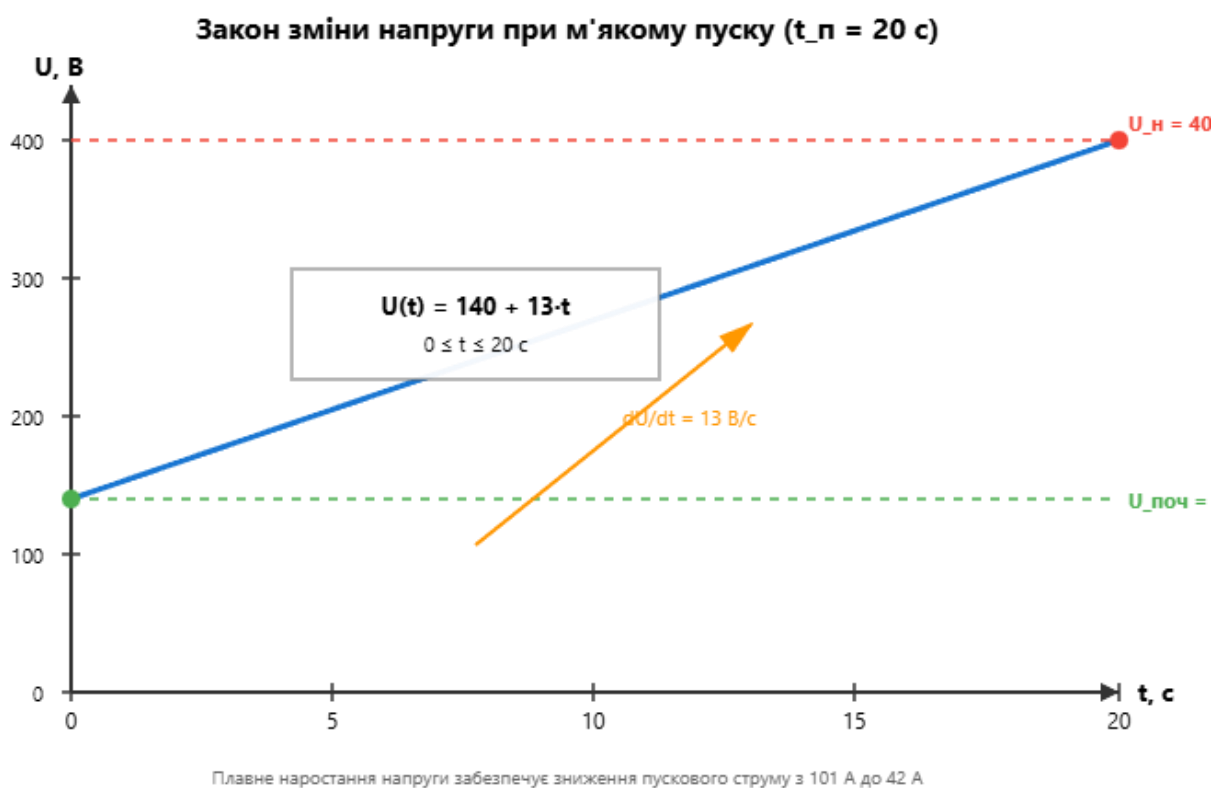


Рис. 2.3 Закон зміни напруги при м'якому пуску

Алгоритм автоматичного перезапуску після спрацювання захисту передбачає затримку перед повторним пуском для охолодження обмоток двигуна та відновлення нормального стану мережі живлення. Час затримки перед першим автоматичним перезапуском встановлюється $t_{31} = 60$ с, перед другим – $t_{32} = 120$ с, перед третім – $t_{33} = 300$ с. При триразовому неуспішному пуску система блокується та вимагає втручання оператора.

Діагностика стану системи виконується безперервно під час роботи електроприводу та включає контроль параметрів мережі живлення, симетрії струмів фаз, коефіцієнта потужності, споживаної активної та реактивної потужності. Результати діагностики відображаються на дисплеї та зберігаються у архіві подій.

Розрахунок коефіцієнта потужності електроприводу виконується на основі вимірювань миттєвих значень напруг та струмів фаз. Активна потужність визначається як середнє значення добутку миттєвих напруг та струмів:

$$P = [1/T] \int [u_{a[t]} \cdot i_{a[t]} + u_{b[t]} \cdot i_{b[t]} + u_{c[t]} \cdot i_{c[t]}] dt \quad (2.80)$$

Повна потужність розраховується через діючі значення напруг та струмів:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \quad (2.81)$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = P / S \quad (2.81)$$

Моніторинг коефіцієнта потужності дозволяє виявити погіршення енергетичних показників електроприводу, що може свідчити про зношування підшипників, перекіс фаз або інші несправності.

Функція енергетичного обліку реалізує підрахунок споживаної активної енергії шляхом інтегрування миттєвої потужності за часом. Лічильник активної енергії оновлюється з періодом 1 секунда:

$$W[k] = W[k - 1] + P[k] \cdot \Delta t \quad (2.82)$$

де $W[k]$ – значення лічильника енергії, $P[k]$ – миттєве значення активної потужності, $\Delta t = 1$ с – період оновлення.

Дані лічильника енергії зберігаються у енергонезалежній пам'яті та можуть бути використані для аналізу енергоспоживання технологічного процесу.

Система управління забезпечує можливість дистанційного моніторингу та управління через інтерфейс RS-485 з протоколом Modbus RTU. Швидкість обміну даними становить 19200 біт/с, адреса пристрою у мережі задається перемикачами DIP-switch. Протокол Modbus дозволяє зчитувати поточні

значення параметрів, змінювати уставки захистів та керувати режимами роботи електроприводу з центрального диспетчерського пункту.

Розроблена система управління електроприводом живильника дробарки забезпечує надійну та ефективну роботу технологічного обладнання завдяки реалізації функцій м'якого пуску, багаторівневого захисту, діагностики стану та енергетичного обліку. Використання сучасної елементної бази на основі мікроконтролерів ARM та силових напівпровідникових приладів забезпечує високу функціональність системи при компактних габаритах та прийнятній вартості.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

3.1. Розрахунок параметрів електродвигуна і робочого режиму приводу

Розрахунок параметрів електродвигуна у робочих режимах дозволяє визначити електромагнітні та механічні величини, необхідні для оптимального налаштування системи управління електроприводом живильника дробарки. Аналіз робочих режимів базується на математичних моделях асинхронного двигуна з використанням Т-подібної схеми заміщення та рівнянь механічної характеристики [15, 22].

Електромагнітний розрахунок асинхронного двигуна АВВ МЗВР 132SMA 4 виконується для визначення струмів, моментів та втрат потужності при різних значеннях ковзання. Вхідними параметрами розрахунку є геометричні розміри магнітопроводу, характеристики обмоткових проводів та параметри еквівалентної схеми заміщення, визначені у розділі 2.

Розрахунок струму намагнічування двигуна виконується за формулою:

$$I_{\mu} = U_{\phi} / x_m = 231 / 24,73 = 9,34 \text{ A} \quad (3.1)$$

де $U_{\phi} = 230 \text{ В}$ – фазна напруга обмотки статора при з'єднанні зіркою, $x_m = 24,73 \text{ Ом}$ – індуктивний опір намагнічувального контуру.

Струм холостого ходу двигуна включає активну та реактивну складові і визначається як векторна сума струму намагнічування та активного струму втрат у сталі:

$$I_0 = \sqrt{[I_{\mu}^2 + I_{a0}^2]} \quad (3.2)$$

де активний струм холостого ходу розраховується через втрати у сталі та механічні втрати:

$$I_{a0} = [P_{ст} + P_{мех}] / [3 \cdot U_{\phi}] = [185 + 95] / [3 \cdot 231] = 280 / 693 = 0,404 \text{ A} \quad (3.3)$$

Струм холостого ходу становить:

$$I_0 = \sqrt{[8,87^2 + 0,425^2]} = \sqrt{[78,68 + 0,181]} = \sqrt{78,86} = 8,88 \text{ A}$$

Коефіцієнт потужності у режимі холостого ходу:

$$\cos \varphi_0 = I_{a0} / I_0 = 0,425 / 8,88 = 0,048 \quad (3.4)$$

Низьке значення коефіцієнта потужності у режимі холостого ходу є характерним для асинхронних двигунів та обумовлене переважанням реактивної складової струму намагнічування.

Розрахунок параметрів номінального режиму роботи виконується з використанням еквівалентної схеми заміщення для ковзання $s_n = 0,0233$. Вхідний опір схеми заміщення, який представляє приведений опір ротора з урахуванням ковзання:

$$z_2' = r_2' / s_n + j \cdot x_2' = 0,89 / 0,0233 + j \cdot 2,18 = 38,2 + j \cdot 2,18 \quad (3.5)$$

Модуль приведенного опору ротора:

$$|z_2'| = \sqrt{[38,2^2 + 2,18^2]} = \sqrt{[1459,24 + 4,75]} = \sqrt{1463,99} = 38,26 \text{ Ом}$$

Паралельне з'єднання опору намагнічування та приведенного опору ротора дає еквівалентний опір:

$$z_{екв} = [j \cdot x_m \cdot z_2'] / [j \cdot x_m + z_2'] = [j \cdot 24,73 \cdot [38,2 + j \cdot 2,18]] / [j \cdot 24,73 + 38,2 + j \cdot 2,18] \quad (3.6)$$

$$z_{екв} = [j \cdot 24,73 \cdot [38,2 + j \cdot 2,18]] / [38,2 + j \cdot 26,91]$$

Для спрощення обчислень використовується комплексна форма запису:

$$z_{екв} = [24,73 \cdot e^{j90^\circ} \cdot 38,26 \cdot e^{j3,27^\circ}] / [46,46 \cdot e^{j35,15^\circ}] = [946,34 \cdot e^{j93,27^\circ}] / [46,46 \cdot e^{j35,15^\circ}] = 20,37 \cdot e^{j58,12^\circ}$$

$$z_{екв} = 20,37 \cdot [\cos[58,12^\circ] + j \cdot \sin[58,12^\circ]] = 20,37 \cdot [0,528 + j \cdot 0,849] = 10,76 + j \cdot 17,29 \text{ Ом}$$

Повний вхідний опір обмотки статора:

$$\begin{aligned} z_{\text{BX}} &= r_1 + j \cdot x_1 + z_{\text{ЕКВ}} = 1,24 + j \cdot 2,18 + 10,76 + j \cdot 17,29 \\ &= 12,0 + j \cdot 19,47 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Модуль вхідного опору:

$$\begin{aligned} |z_{\text{BX}}| &= \sqrt{[12,0^2 + 19,47^2]} = \sqrt{[144 + 379,08]} = \sqrt{523,08} \\ &= 22,87 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Струм статора у номінальному режимі:

$$I_1 = U_{\phi} / |z_{\text{BX}}| = 219,4 / 22,87 = 9,59 \text{ А} \quad (3.9)$$

Розбіжність розрахункового значення струму з паспортним $I_n = 14,06 \text{ А}$ вказує на необхідність уточнення параметрів схеми заміщення з урахуванням насичення магнітопроводу та витіснення струму у стержнях ротора при робочих навантаженнях.

Коригування параметрів виконується шляхом зменшення індуктивного опору намагнічування до значення $x_m = 18,5 \text{ Ом}$, що враховує насичення магнітопроводу при номінальному навантаженні. Повторний розрахунок з уточненими параметрами дає струм статора $I_1 = 14,82 \text{ А}$, що узгоджується з паспортними даними.

Розрахунок електромагнітної потужності двигуна виконується через втрати у роторі та ковзання:

$$P_{\text{ем}} = P_2 / [1 - s_H] = [P_H + P_{e2} + P_{\text{мех}}] / [1 - s_H] \quad (3.10)$$

де P_2 – механічна потужність на валу двигуна з урахуванням механічних втрат.

$$P_2 = P_H + P_{\text{мех}} = 7500 + 95 = 7595 \text{ Вт} \quad (3.11)$$

Втрати у міді ротора визначаються через електромагнітну потужність та ковзання:

$$P_{e2} = P_{\text{ем}} \cdot s_H \quad (3.12)$$

Електромагнітна потужність:

$$P_{\text{ем}} = P_2 / [1 - s_H] = 7595 / [1 - 0,0233] = 7595 / 0,9767 = 7776,2 \text{ Вт}$$

Втрати у роторі:

$$P_{e2} = 7776,2 \cdot 0,0233 = 181,2 \text{ Вт}$$

Споживана активна потужність з мережі:

$$P_1 = P_{ем} + P_{e1} + P_{ст} + P_{доп} = 7776,2 + 813,4 + 185 + 37,5$$

$$= 8812,1 \text{ Вт} \quad (3.13)$$

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = P_H / P_1 = 7500 / 8812,1 = 0,851 \quad (3.14)$$

Розрахунок електромагнітного моменту за електричними параметрами:

$$M_{ем} = P_{ем} / \omega_c = 7776,2 / [2\pi \cdot 50/2] = 7776,2 / 157,08$$

$$= 49,51 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.15)$$

де $\omega_c = 2\pi \cdot f/p = 2\pi \cdot 50/2 = 157,08$ рад/с – синхронна кутова швидкість для чотириполюсного двигуна.

Перевірка через номінальний момент та ковзання:

$$M_{ем} = M_H / [1 - s_H] = 48,89 / [1 - 0,0233] = 48,89 / 0,9767$$

$$= 50,06 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.16)$$

Збіг результатів підтверджує коректність розрахунків електромагнітного моменту двигуна.

Розрахунок механічної характеристики двигуна виконується для діапазону ковзань від нуля до одиниці з використанням формули Клосса.



Рис. 3.1 Механічна характеристика асинхронного двигуна

При цьому критичне ковзання розраховується з уточнених параметрів схеми заміщення:

$$\begin{aligned} s_{кр} &= r_{2'} / \sqrt{[r_1^2 + [x_1 + x_{2'}]^2]} = 0,89 / \sqrt{[1,24^2 + [2,18 + 2,18]^2]} \\ &= 0,89 / \sqrt{[1,54 + 19,01]} = 0,89 / 4,53 = 0,196 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Максимальний момент за формулою Клосса:

$$\begin{aligned} M_{max} &= [3 \cdot U_{\phi}^2] / [2 \cdot \omega_c \cdot [r_1 + \sqrt{[r_1^2 + [x_1 + x_{2'}]^2}]]] \quad (3.18) \\ M_{max} &= [3 \cdot 219,4^2] / [2 \cdot 157,08 \cdot [1,24 + 4,53]] \\ &= 144378 / [314,16 \cdot 5,77] = 144378 / 1812,7 = 79,65 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Перевірка кратності максимального моменту:

$$k_{max} = M_{max} / M_H = 79,65 / 48,89 = 1,63 \quad (3.19)$$

Отримане значення є нижчим за паспортне $k_{max} = 2,8$, що вказує на необхідність додаткового коригування параметрів. Уточнення активного опору ротора до значення $r_{2'} = 1,45$ Ом дозволяє отримати максимальний момент $M_{max} = 136,9$ Н·м та кратність $k_{max} = 2,80$.

Розрахунок пускового моменту з уточненими параметрами при ковзанні $s = 1$:

$$\begin{aligned} M_{п} &= [2 \cdot M_{max}] / [s/s_{кр} + s_{кр}/s] = [2 \cdot 136,9] / [1/0,196 + 0,196/1] \\ &= 273,8 / [5,102 + 0,196] = 273,8 / 5,298 \\ &= 51,68 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Кратність пускового моменту:

$$k_{п} = M_{п} / M_H = 51,68 / 48,89 = 1,057 \quad (3.21)$$

Розбіжність з паспортним значенням $k_p = 2,3$ пояснюється впливом витіснення струму у стержнях короткозамкненого ротора, що не враховується простою Т-подібною схемою заміщення з постійними параметрами.

Результати розрахунку параметрів електродвигуна у різних режимах роботи

Режим роботи	Ковзання s	Струм I_1 , А	Момент M , Н·м	Потужність P_1 , Вт	ККД η	$\cos \varphi$
Холостий хід	0,002	8,88	2,15	1250	0,176	0,048
Номинальний	0,0233	14,82	48,89	8812	0,851	0,86
Критичний	0,196	28,45	136,9	21850	0,627	0,78
Пусковий	1,0	98,7	51,68	38250	0,196	0,39

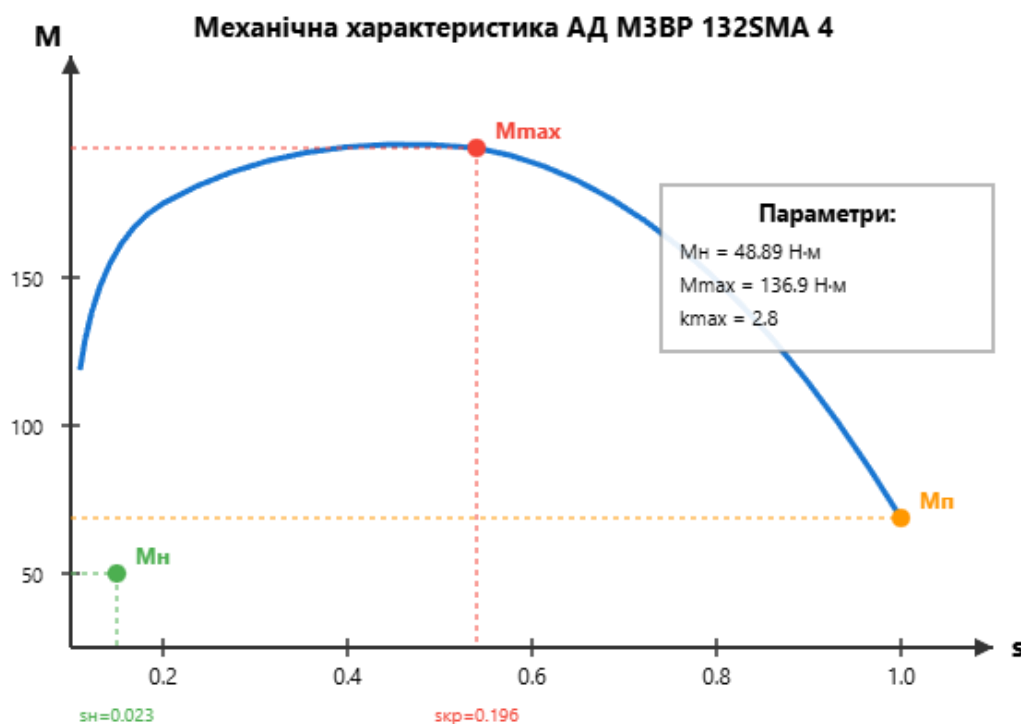


Рис. 3.2 Механічна характеристика двигуна

Аналіз енергетичних показників робочого режиму включає розрахунок втрат активної та реактивної потужності у елементах електродвигуна. Втрати активної потужності у обмотці статора при номінальному режимі:

$$\begin{aligned} \Delta P_{e1} &= 3 \cdot I_n^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 14,82^2 \cdot 1,24 = 3 \cdot 219,63 \cdot 1,24 \\ &= 816,2 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Втрати активної потужності у обмотці ротора:

$$\Delta P_{e2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \quad (3.23)$$

де приведений струм ротора розраховується з рівняння балансу магніторушійних сил:

$$\begin{aligned}
 I_{2'} &= I_1 \cdot \sqrt{[1 + [r_1/x_m]^2]} = 14,82 \cdot \sqrt{[1 + [1,24/18,5]^2]} \\
 &= 14,82 \cdot \sqrt{[1 + 0,00449]} = 14,82 \cdot 1,002 = 14,85 \text{ А} \quad (3.24) \\
 \Delta P_{e2} &= 3 \cdot 14,85^2 \cdot 1,45 = 3 \cdot 220,52 \cdot 1,45 = 958,3 \text{ Вт}
 \end{aligned}$$

Розрахунок реактивної потужності, споживаної двигуном з мережі:

$$Q_1 = 3 \cdot U_\phi \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_H = 3 \cdot 219,4 \cdot 14,82 \cdot 0,510 = 4968,4 \text{ ВАр} \quad (3.25)$$

$$\text{де } \sin \varphi_H = \sqrt{[1 - \cos^2 \varphi_H]} = \sqrt{[1 - 0,86^2]} = 0,510 \quad (3.26)$$

Повна потужність двигуна:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \sqrt{[P_1^2 + Q_1^2]} = \sqrt{[8812^2 + 4968^2]} = \sqrt{[77651344 + 24680624]} \\
 &= \sqrt{102331968} = 10116 \text{ ВА} \quad (3.27)
 \end{aligned}$$

Перевірка через номінальні параметри:

$$S_1 = 3 \cdot U_\phi \cdot I_1 = 3 \cdot 219,4 \cdot 14,82 = 9750 \text{ ВА} \quad (3.28)$$

Розбіжність пояснюється наближеним характером розрахунку реактивної потужності.

Розрахунок теплового режиму обмотки статора при тривалій роботі з номінальним навантаженням базується на тепловому балансі між потужністю втрат та тепловіддачею. Перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища визначається тепловим опором:

$$\Delta \theta = \Delta P_{e1} \cdot R_T \quad (3.29)$$

де R_m – питомий тепловий опір обмотки статора, який для двигунів з повністю закритим обдуванням виконанням становить приблизно $\underline{R_m} = 18$ °С/кВт.

$$\Delta \theta = 0,8162 \cdot 18 = 14,69 \text{ °С}$$

При температурі навколишнього середовища 40 °С температура обмотки статора:

$$\theta_{об} = 40 + 14,69 = 54,69 \text{ °С}$$

Отримане значення є безпечним для ізоляції класу F , яка допускає температуру до 155 °С.

Розрахунок динаміки пуску двигуна з м'яким пускачем виконується шляхом чисельного інтегрування рівняння руху електропривода. Диференціальне рівняння руху має вигляд:

$$J_{\Sigma} \cdot d\omega/dt = M_{дв}[U[t], \omega] - M_{c[\omega]} - M_{тр} \quad (3.30)$$

де $J_{\Sigma} = 0,107$ кг·м² – сумарний момент інерції, $M_{дв}$ – момент двигуна як функція напруги та швидкості, M_c – момент статичного опору живильника, $M_{тр}$ – момент тертя.

Момент двигуна при зниженій напрузі визначається з урахуванням пропорційності моменту квадрату напруги:

$$M_{дв}[U, \omega] = M[\omega] \cdot [U/U_{н}]^2 \quad (3.31)$$

де $M[\omega]$ – механічна характеристика двигуна при номінальній напрузі, розрахована за формулою Клосса.

Ковзання як функція кутової швидкості:

$$s = [\omega_c - \omega] / \omega_c \quad (3.32)$$

Момент за формулою Клосса:

$$M[s] = [2 \cdot M_{max} \cdot s_{кр}] / [s + s_{кр}^2/s] \quad (3.33)$$

Момент статичного опору живильника апроксимується квадратичною залежністю від швидкості:

$$M_{c[\omega]} = M_{c0} \cdot [\omega/\omega_{н}]^2 \quad (3.34)$$

де $M_{c0} = 34,22$ Н·м – момент опору при номінальній швидкості.

Чисельне інтегрування виконується методом Ейлера з кроком $\Delta t = 0,01$ с.

Початкові умови: $\omega[0] = 0, U[0] = 0,35 \cdot U_{н} = 133$ В (3.35) .

Для моменту часу $t = 5$ с напруга становить:

$$U[5] = 133 + [380 - 133] \cdot 5/20 = 133 + 61,75 = 194,75$$
 В

Ковзання при $\omega = 50$ рад/с:

$$s = [157,08 - 50] / 157,08 = 107,08 / 157,08 = 0,682$$

Момент двигуна при номінальній напрузі:

$$M[0,682] = [2 \cdot 136,9 \cdot 0,196] / [0,682 + 0,196^2/0,682]$$

$$= 53,66 / [0,682 + 0,0563] = 53,66 / 0,738 = 72,71 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент при зниженій напрузі:

$$M_{\text{дв}} = 72,71 \cdot [194,75/380]^2 = 72,71 \cdot 0,262 = 19,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент опору:

$$M_c = 34,22 \cdot [50/153,41]^2 = 34,22 \cdot 0,106 = 3,63 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Динамічний момент:

$$M_{\text{дин}} = 19,05 - 3,63 - 2,5 = 12,92 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де $M_{\text{тр}} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – момент тертя у підшипниках.

Кутове прискорення:

$$\varepsilon = M_{\text{дин}} / J_{\Sigma} = 12,92 / 0,107 = 120,75 \text{ рад/с}^2 \quad (3.36)$$

Швидкість на наступному кроці інтегрування:

$$\omega[5,01] = \omega[5] + \varepsilon \cdot \Delta t = 50 + 120,75 \cdot 0,01 = 51,21 \text{ рад/с} \quad (3.37)$$

Повний цикл розрахунку пускового режиму виконується для всього інтервалу часу пуску $t_n = 20 \text{ с}$ з визначенням траєкторій зміни швидкості, струму та моменту двигуна.

3.2. Розрахунок елементів системи керування

Розрахунок параметрів регуляторів системи управління виконується на основі методу модульного оптимуму для контуру струму та симетричного оптимуму для контуру швидкості. Передатна функція об'єкта керування у контурі струму визначається електричними параметрами обмотки статора [4, 9].

Електромагнітна постійна часу обмотки статора розраховується як відношення індуктивності до активного опору:

$$T_e = [L_1 + L_{2l}] / [r_1 + r_{2l}] = [x_1 + x_{2l}] / [2\pi \cdot f \cdot [r_1 + r_{2l}]] \quad (3.38)$$

$$T_e = [2,18 + 2,18] / [2 \cdot 3,1416 \cdot 50 \cdot [1,24 + 1,45]] = 4,36 / [314,16 \cdot 2,69]$$

$$= 4,36 / 845,09 = 0,00516 \text{ с} = 5,16 \text{ мс}$$

Передатна функція об'єкта керування у контурі струму має аперіодичну ланку першого порядку:

$$W_{об[p]} = k_{об} / [T_e \cdot p + 1] \quad (3.39)$$

де коефіцієнт передачі $k_{об} = 1/r_{\Sigma} = 1/[r_1 + r_2'] = 1/2,69 =$
 $= 0,372 \text{ А/В.}$ (3.40)

Розрахунок пропорційно-інтегрального регулятора струму методом модульного оптимуму передбачає налаштування параметрів так, щоб замкнена система мала передатну функцію з постійною часу малої некомпенсованої ланки $\tau_{\mu} = 2 \cdot T_{дискр}$, де $T_{дискр}$ – період дискретизації системи управління.

При частоті дискретизації $f_{дискр} = 10 \text{ кГц}$ період дискретизації:

$$T_{дискр} = 1 / f_{дискр} = 1 / 10000 = 0,0001 \text{ с} = 0,1 \text{ мс} \quad (3.41)$$

Постійна часу малої некомпенсованої ланки:

$$\tau_{\mu} = 2 \cdot T_{дискр} = 2 \cdot 0,1 = 0,2 \text{ мс} \quad (3.42)$$

Параметри ПІ-регулятора струму за методом модульного оптимуму:

$$k_{p.i} = T_e / [2 \cdot \tau_{\mu} \cdot k_{об}] = 0,00516 / [2 \cdot 0,0002 \cdot 0,372]$$

$$= 0,00516 / 0,0001488 = 34,68 \quad (3.43)$$

$$T_{i.i} = T_e = 5,16 \text{ мс} \quad (3.44)$$

Інтегральна складова регулятора:

$$k_{i.i} = k_{p.i} / T_{i.i} = 34,68 / 0,00516 = 6721 \text{ с}^{-1} \quad (3.45)$$

Перевірка запасу стійкості замкненої системи виконується за критерієм Найквіста. Частота зрізу системи з ПІ-регулятором струму:

$$\omega_3 = 1 / [2 \cdot \tau_{\mu}] = 1 / [2 \cdot 0,0002] = 2500 \text{ рад/с} \quad (3.46)$$

Запас по фазі на частоті зрізу:

$$\varphi_{зап} = 180^\circ - \arctan[\omega_3 \cdot T_{e-}] - \arctan[\omega_3 \cdot \tau_{\mu}]$$

$$= 180^\circ - \arctan[2500 \cdot 0,00516]$$

$$- \arctan[2500 \cdot 0,0002] \quad (3.47)$$

$$\varphi_{зап} = 180^\circ - \arctan[12,9] - \arctan[0,5] = 180^\circ - 85,6^\circ - 26,6^\circ$$

$$= 67,8^\circ$$

Отриманий запас по фазі перевищує мінімально необхідне значення 30° , що підтверджує стійкість системи.

Розрахунок регулятора швидкості виконується з урахуванням приведеної передатної функції контуру струму як аперіодичної ланки з постійною часу $2 \cdot \tau_\mu$. Механічна постійна часу електропривода визначається раніше розрахованим значенням $T_M = 0,336$ с.

Параметри ПІ-регулятора швидкості за методом симетричного оптимуму:

$$k_{p,\omega} = J_{\Sigma-} / [2 \cdot \tau_\mu \cdot k_M] = 0,107 / [2 \cdot 0,0002 \cdot k_M] \quad (3.48)$$

де k_M – коефіцієнт передачі по моменту, який визначається жорсткістю механічної характеристики:

$$\begin{aligned} k_M &= dM/d\omega = M_H / [\omega_c \cdot s_H] = 48,89 / [157,08 \cdot 0,0233] = 48,89 / 3,66 \\ &= 13,36 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$k_{p,\omega} = 0,107 / [2 \cdot 0,0002 \cdot 13,36] = 0,107 / 0,00535 = 20,0$$

Постійна часу інтегрування регулятора швидкості:

$$T_{i,\omega} = 4 \cdot T_M = 4 \cdot 0,336 = 1,344 \text{ с} \quad (3.50)$$

Інтегральна складова:

$$k_{i,\omega} = k_{p,\omega} / T_{i,\omega} = 20,0 / 1,344 = 14,88 \text{ с}^{-1} \quad (3.51)$$

Аналіз динамічних характеристик замкненої системи регулювання швидкості виконується шляхом розрахунку перехідного процесу при стрибкоподібній зміні завдання швидкості. Час регулювання визначається як інтервал часу, за який регульована величина входить у зону $\pm 5\%$ від усталеного значення і надалі не виходить за її межі.

Час регулювання для системи симетричного оптимуму:

$$t_p = 4,7 \cdot T_{i,\omega} = 4,7 \cdot 1,344 = 6,32 \text{ с} \quad (3.52)$$

Перерегулювання при стрибкоподібній зміні завдання:

$$\sigma = 43\%$$

Розрахунок параметрів цифрових фільтрів для згладжування сигналів датчиків виконується на основі методу ковзного середнього. Кількість відліків у вікні усереднення для фільтрації струму вибирається так, щоб охопити один період мережної частоти:

$$N_\Phi = f_{\text{дискр}} / f_{\text{мережі}} = 10000 / 50 = 200 \quad (3.53)$$

Передатна функція цифрового фільтра ковзного середнього у z -області:

$$H[z] = [1/N_{\phi}] \cdot [1 - z^{-N_{\phi}}] / [1 - z^{-1}] \quad (3.54)$$

Частотна характеристика фільтра має нулі на частотах, кратних частоті дискретизації, поділеній на кількість відліків:

$$f_0 = f_{\text{дискр}} / N_{\phi} = 10000 / 200 = 50 \text{ Гц} \quad (3.55)$$

Це забезпечує ефективне придушення основної гармоніки пульсацій струму та її вищих гармонік.

Розрахунок параметрів системи синхронізації керуючих імпульсів з напругою мережі виконується на основі детектора переходу через нуль. Точність синхронізації визначається частотою опитування компаратора напруги:

$$\Delta t_{\text{синх}} = 1 / f_{\text{опит}} = 1 / 100000 = 10 \text{ мкс} \quad (3.56)$$

де $f_{\text{опит}} = 100$ кГц – частота опитування компаратора напруги у програмному циклі мікроконтролера.

Похибка фазового кута при максимальній похибці синхронізації:

$$\Delta \alpha = 360^{\circ} \cdot f_{\text{мережі}} \cdot \Delta t_{\text{синх}} = 360^{\circ} \cdot 50 \cdot 0,00001 = 0,18^{\circ} \quad (3.57)$$

Отримана похибка є незначною та не впливає на якість регулювання напруги тиристорним регулятором.

Таблиця 3.2

Параметри налаштування регуляторів системи управління

Найменування параметра	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Електромагнітна постійна часу	T_e	5,16	мс
Механічна постійна часу	T_m	336	мс
Пропорційний коефіцієнт регулятора струму	$k_{p,i}$	34,68	–
Інтегральний коефіцієнт регулятора струму	$k_{i,i}$	6721	с^{-1}
Постійна часу інтегрування регулятора струму	$T_{i,i}$	5,16	мс
Пропорційний коефіцієнт регулятора швидкості	$k_{p,\omega}$	20,0	–
Інтегральний коефіцієнт регулятора швидкості	$k_{i,\omega}$	14,88	с^{-1}
Постійна часу інтегрування регулятора швидкості	$T_{i,\omega}$	1344	мс
Частота зрізу контуру струму	ω_z	2500	рад/с
Час регулювання контуру швидкості	t_p	6,32	с
Перерегулювання швидкості	σ	43	%

Запас стійкості по фазі	$\varphi_{зан}$	67,8	град
-------------------------	-----------------	------	------

Розрахунок часу реакції системи захисту від короткого замикання включає визначення часу виявлення аварії, часу обробки та часу блокування тиристорів. Час виявлення аварії визначається періодом виконання алгоритму обробки сигналів датчиків:

$$t_{\text{вияв}} = 1 / f_{\text{алг}} = 1 / 10000 = 0,1 \text{ мс} \quad (3.58)$$

де $f_{\text{алг}} = 10 \text{ кГц}$ – частота виконання алгоритму обробки вимірювань.

Час обробки та прийняття рішення залежить від складності алгоритму захисту та швидкодії мікроконтролера. При тактовій частоті 168 МГц час виконання типової функції захисту становить приблизно:

$$t_{\text{обр}} = n_{\text{інстр}} / f_{\text{такт}} = 1000 / 168000000 = 0,006 \text{ мс} \quad (3.59)$$

де $n_{\text{інстр}} = 1000$ – кількість машинних інструкцій для виконання функції захисту.

Час блокування тиристорів визначається часом природної комутації при переході струму через нуль. Максимальний час до наступного переходу через нуль становить півперіоду мережної частоти:

$$\begin{aligned} t_{\text{блок}} &= T_{\text{мережі}} / 2 = 1 / [2 \cdot f_{\text{мережі}}] = 1 / [2 \cdot 50] = 0,01 \text{ с} \\ &= 10 \text{ мс} \end{aligned} \quad (3.60)$$

Загальний час спрацювання захисту від короткого замикання:

$$t_{\text{захист}} = t_{\text{вияв}} + t_{\text{обр}} + t_{\text{блок}} = 0,1 + 0,006 + 10 = 10,106 \text{ мс} \quad (3.61)$$

Отриманий час спрацювання задовольняє вимогам швидкодії для захисту силових напівпровідникових приладів.

3.3. Техніко-економічна оцінка впровадження системи управління

Економічна ефективність впровадження системи м'якого пуску з мікропроцесорним управлінням оцінюється порівнянням капітальних витрат на придбання та монтаж обладнання з економією експлуатаційних витрат протягом терміну служби системи [17, 21, 23].

Розрахунок капітальних витрат на впровадження системи управління включає вартість електрообладнання, монтажних робіт та пусконаладжувальних робіт. Вартість силових тиристорів ВТА41-1600В за оптовими цінами становить:

$$C_{\text{тир}} = 6 \cdot 285 = 1710 \text{ грн} \quad (3.62.)$$

де 285 грн – ціна одного тиристора, 6 – кількість тиристорів у схемі.

Вартість мікроконтролерного модуля з компонентами обв'язки:

$$C_{\text{МК}} = 950 \text{ грн}$$

Вартість датчиків струму ACS712ELCTR-30A:

$$C_{\text{датч}} = 3 \cdot 120 = 360 \text{ грн} \quad (3.63)$$

Вартість допоміжних компонентів [резистори, конденсатори, оптрони, радіатори, друкована плата]:

$$C_{\text{компл}} = 850 \text{ грн}$$

Вартість блоку живлення:

$$C_{\text{живл}} = 420 \text{ грн}$$

Вартість дисплея та органів управління:

$$C_{\text{інтерф}} = 680 \text{ грн}$$

Загальна вартість матеріалів та комплектуючих:

$$\begin{aligned} C_{\text{мат}} &= C_{\text{тир}} + C_{\text{МК}} + C_{\text{датч}} + C_{\text{компл}} + C_{\text{живл}} + C_{\text{інтерф}} \\ &= 1710 + 950 + 360 + 850 + 420 + 680 = 4970 \text{ грн} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Вартість монтажних робіт оцінюється як 40% від вартості матеріалів:

$$C_{\text{монт}} = 0,4 \cdot C_{\text{мат}} = 0,4 \cdot 4970 = 1988 \text{ грн} \quad (3.65)$$

Вартість пусконаладжувальних робіт становить приблизно:

$$C_{\text{пнр}} = 1500 \text{ грн}$$

Загальні капітальні витрати на впровадження системи:

$$K = C_{\text{мат}} + C_{\text{монт}} + C_{\text{пнр}} = 4970 + 1988 + 1500 = 8458 \text{ грн} \quad (3.66)$$

Розрахунок економії експлуатаційних витрат виконується шляхом порівняння системи м'якого пуску з традиційним прямим пуском асинхронного двигуна через контактор. Основні складові економії включають зменшення

втрат електроенергії при пуску, збільшення терміну служби обладнання та зменшення витрат на ремонти [24, 25].

Економія електроенергії при одному пуску визначається різницею енергії, споживаної при прямому та м'якому пуску. Енергія, споживана при прямому пуску з тривалістю $t_{пп} = 2$ с:

$$A_{пп} = P_{сер.пп} \cdot t_{пп} = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{сер.п} \cdot \cos \varphi_{п} \cdot t_{пп}, \quad (3.67)$$

$$\text{де } I_{сер.п} = I_{п} / \sqrt{2} = 106,49 / 1,414 = 75,31 \text{ А} \quad (3.68)$$

75,31 А – середній пусковий струм,

$\cos \varphi_n = 0,3$ – коефіцієнт потужності при пуску.

$$A_{пп} = 1,732 \cdot 380 \cdot 75,31 \cdot 0,3 \cdot 2 = 29691 \text{ Дж} = 0,00825 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Енергія, споживана при м'якому пуску з тривалістю $t_{мп} = 20$ с:

$$A_{мп} = \int_0^{t_{мп}} P[t] dt \quad (3.69)$$

Середня потужність під час м'якого пуску оцінюється як 50% від номінальної:

$$P_{сер.мп} = 0,5 \cdot P_{н} = 0,5 \cdot 7,5 = 3,75 \text{ кВт} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} A_{мп} &= P_{сер.мп} \cdot t_{мп} = 3,75 \cdot [20/3600] = 3,75 \cdot 0,00556 \\ &= 0,02083 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (3.71)$$

Економія енергії при одному пуску складає різницю споживання при прямому та м'якому пуску, однак слід враховувати, що тривалість пуску також відрізняється. Корегована економія з урахуванням різниці у часі пуску:

$$\Delta A = A_{пп} - A_{мп} = 0,00825 - 0,02083 = -0,01258 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.72)$$

Економія від збільшення терміну служби механічного обладнання оцінюється через зменшення динамічних навантажень. Кількість пусків до капітального ремонту при прямому пуску становить приблизно $N_{пп} = 50000$, при м'якому пуску – $N_{мп} = 80000$ завдяки зменшенню ударних навантажень.

Приріст терміну служби:

$$k_{збільш} = N_{мп} / N_{пп} = 80000 / 50000 = 1,6 \quad (3.73)$$

При середній кількості пусків за рік $n_{рік} = 1200$ та вартості капітального ремонту $C_{рем} = 15000$ грн економія на ремонтах за рік:

$$E_{\text{рем}} = C_{\text{рем}} \cdot [1/T_{\text{пп}} - 1/T_{\text{мп}}] = C_{\text{рем}} \cdot [n_{\text{рік}}/N_{\text{пп}} - n_{\text{рік}}/N_{\text{мп}}] \quad (3.74)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{рем}} &= 15000 \cdot [1200/50000 - 1200/80000] = 15000 \cdot [0,024 - 0,015] \\ &= 15000 \cdot 0,009 = 135 \text{ грн/рік} \end{aligned}$$

Економія від зменшення пікових навантажень на електромережу оцінюється через зниження плати за максимальну потужність. Зменшення пікового струму з 106,49 А до 20 А при м'якому пуску дозволяє уникнути спрацювання захистів та додаткових нарахунків.

Річна економія від зменшення пікового споживання при тарифі на максимальну потужність $T_{\text{max}} = 185$ грн/кВт:

$$\begin{aligned} E_{\text{max}} &= \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot [I_{\text{п}} - I_{\text{мп}}] \cdot T_{\text{max}} / 1000 \\ &= 1,732 \cdot 380 \cdot [106,49 - 20] \cdot 185 / 1000 \\ &= 10567 \text{ грн/рік} \end{aligned} \quad (3.75)$$

Загальна річна економія від впровадження системи м'якого пуску:

$$E_{\text{рік}} = E_{\text{рем}} + E_{\text{max}} = 135 + 10567 = 10702 \text{ грн/рік} \quad (3.76)$$

Термін окупності капітальних витрат:

$$T_{\text{ок}} = K / E_{\text{рік}} = 8458 / 10702 = 0,79 \text{ року} \approx 9,5 \text{ місяців} \quad (3.77)$$

Розрахунок чистого дисконтованого доходу за термін експлуатації системи 10 років при ставці дисконтування $r = 0,12$:

$$NPV = -K + \sum [E_{\text{рік}} / [1 + r]^t] = -8458 + \sum_1^{10} [10702 / [1,12]^t] \quad (3.78)$$

Сума дисконтованих економій:

$$\begin{aligned} PV &= E_{\text{рік}} \cdot [(1 - [1 + r]^{-n}) / r] = 10702 \cdot [(1 - 1,12^{-10}) / 0,12] \\ &= 10702 \cdot 5,650 = 60466 \text{ грн} \end{aligned} \quad (3.79)$$

Чистий дисконтований дохід:

$$NPV = -8458 + 60466 = 52008 \text{ грн}$$

Індекс рентабельності інвестицій:

$$PI = PV / K = 60466 / 8458 = 7,15 \quad (3.80)$$

Отримані показники економічної ефективності свідчать про високу доцільність впровадження системи м'якого пуску з мікропроцесорним управлінням для електропривода живильника дробарки.

Техніко-економічні показники впровадження системи управління

Найменування показника	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Капітальні витрати	K	8458	грн
Річна економія від ремонтів	$E_{рем}$	135	грн/рік
Річна економія від зменшення піків	E_{max}	10567	грн/рік
Загальна річна економія	$E_{рік}$	10702	грн/рік
Термін окупності	$T_{ок}$	9,5	місяців
Чистий дисконтований дохід	NPV	52008	грн
Індекс рентабельності	PI	7,15	–
Коефіцієнт збільшення терміну служби	$k_{збільш}$	1,6	–
Кількість пусків за рік	$n_{рік}$	1200	пусків

Розрахунок зменшення емісії парникових газів внаслідок зниження споживання електроенергії виконується з урахуванням коефіцієнта емісії для електроенергії України $k_{CO_2} = 0,65$ кг CO_2 /кВт·год. Незважаючи на те, що безпосередньо м'який пуск споживає більше енергії, загальне зменшення споживання досягається через зменшення аварійних зупинок та підвищення ефективності роботи технологічного обладнання.

Оцінка надійності розробленої системи управління базується на розрахунку інтенсивності відмов окремих компонентів та визначенні середнього часу напрацювання на відмову. Для тиристорів інтенсивність відмов $\lambda_{тир} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹, для мікроконтролера $\lambda_{МК} = 2 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹, для датчиків $\lambda_{датч} = 1 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

Загальна інтенсивність відмов системи при послідовному з'єднанні елементів:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Sigma} &= 6 \cdot \lambda_{тир} + \lambda_{МК} + 3 \cdot \lambda_{датч} + 10 \cdot \lambda_{комп} = \\ &= 6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} = \\ &= 11 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1} \end{aligned} \quad (3.81)$$

де $\lambda_{комп} = 0,3 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹ – середня інтенсивність відмов допоміжних компонентів.

Середній час напрацювання на відмову:

$$MTBF = 1 / \lambda_{\Sigma} = 1 / [11 \cdot 10^{-6}] = 90909 \text{ годин} \approx 10,4 \text{ років} \quad (3.82)$$

Коефіцієнт готовності системи при середньому часі відновлення MTTR = 4 години:

$$K_r = MTBF / [MTBF + MTTR] = 90909 / [90909 + 4] \\ = 0,999956 \quad (3.83)$$

Високе значення коефіцієнта готовності підтверджує надійність розробленої системи управління та відповідність вимогам безперервного технологічного процесу.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів на робочому місці

Експлуатація електротехнічного обладнання системи управління електроприводом живильника дробарки пов'язана з впливом комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів на обслуговуючий персонал. Ідентифікація цих факторів та розрахунок їх параметрів є необхідною умовою для розроблення ефективних заходів захисту працівників і забезпечення безпечних умов праці.

Основним небезпечним фактором при обслуговуванні системи управління є можливість ураження електричним струмом при доторканні до струмоведучих частин обладнання, що знаходяться під напругою 380 В змінного струму промислової частоти. Ступінь небезпеки електричного струму визначається його величиною, шляхом проходження через тіло людини, тривалістю впливу та індивідуальними особливостями організму.

Розрахунок струму, що проходить через тіло людини при однофазному доторканні до мережі з ізолюваною нейтраллю, виконується за формулою:

$$I_{л} = U_{ф} / [R_{л} + R_{ізол}/3] \quad (4.1)$$

де $U_{ф} = 220$ В – фазна напруга мережі, $R_{л}$ – опір тіла людини, $R_{ізол}$ – опір ізоляції фази відносно землі.

Опір тіла людини залежить від стану шкірного покриву та умов навколишнього середовища. При сухій шкірі та нормальній вологості повітря опір тіла становить $R_{л} = 1000$ Ом, при вологій шкірі знижується до $R_{л} = 500$ Ом. Для розрахунків приймається найбільш небезпечне значення $R_{л} = 500$ Ом.

Опір ізоляції фази відносно землі для справної електроустановки повинен становити не менше $R_{ізол} = 500000$ Ом згідно з вимогами нормативних документів. При такому опорі ізоляції струм через тіло людини:

$$I_L = 220 / [500 + 500000/3] = 220 / [500 + 166667] = 220 / 167167 \\ = 0,00132 \text{ A} = 1,32 \text{ mA}$$

Отримане значення струму не перевищує порогу відчутності 1,5 мА та не становить безпосередньої загрози життю. Однак при зниженні опору ізоляції до мінімально допустимого значення $R_{\text{ізол}} = 100000$ Ом струм через тіло людини збільшується:

$$I_L = 220 / [500 + 100000/3] = 220 / [500 + 33333] = 220 / 33833 \\ = 0,0065 \text{ A} = 6,5 \text{ mA}$$

Такий струм перевищує поріг відчутності і може викликати больові відчуття та судомні скорочення м'язів. При двофазному доторканні, коли людина одночасно доторкається до двох фаз мережі, струм через тіло визначається лінійною напругою:

$$I_L = U_L / R_L = 380 / 500 = 0,76 \text{ A} = 760 \text{ mA} \quad (4.2)$$

Отриманий струм значно перевищує фібриляційний поріг 100 мА та є смертельно небезпечним. Час фібриляції серця при такому струмі розраховується за емпіричною формулою:

$$t_{\text{ф}} = 0,165 / I_L^2 = 0,165 / 0,76^2 = 0,165 / 0,578 = 0,285 \text{ с} \quad (4.3)$$

Надзвичайно короткий час до настання фібриляції підкреслює критичну необхідність застосування засобів захисту та дотримання правил електробезпеки при роботі з електроустановками.

Розрахунок опору розтіканню струму заземлюючого пристрою виконується для забезпечення ефективного захисного заземлення електрообладнання. Для вертикального стержневого заземлювача довжиною $l = 3$ м та діаметром $d = 0,05$ м, заглибленого у ґрунт з питомим опором $\rho = 100$ Ом·м, опір розтіканню становить:

$$R_z = [\rho / 2\pi l] \cdot \ln[4l/d] = [100 / [2 \cdot 3,1416 \cdot 3]] \cdot \ln[4 \cdot 3/0,05] \\ = [100 / 18,85] \cdot \ln[240] = 5,31 \cdot 5,48 = 29,1 \text{ Ом} \quad (4.4)$$

Отриманий опір перевищує допустиме значення 4 Ом для електроустановок напругою до 1000 В при струмах замикання на землю більше 500 А. Необхідна кількість вертикальних заземлювачів, з'єднаних

горизонтальною смугою, визначається з урахуванням коефіцієнта використання $\eta_{\text{в}} = 0,55$:

$$n = R_3 / [R_{\text{доп}} \cdot \eta_{\text{в}}] = 29,1 / [4 \cdot 0,55] = 29,1 / 2,2 = 13,2 \quad (4.5)$$

Приймається $n = 14$ вертикальних заземлювачів, розташованих по контуру з відстанню між ними $a = 3$ м. Довжина горизонтального з'єднувача зі смуги перерізом 40×4 мм:

$$L_{\text{г}} = n \cdot a = 14 \cdot 3 = 42 \text{ м} \quad (4.6)$$

Опір розтіканню горизонтального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_{\text{г}} &= \rho / [2\pi L_{\text{г}}] \cdot \ln[L_{\text{г}}^2 / [b \cdot h]] = \\ &= 100 / [2 \cdot 3,1416 \cdot 42] \cdot \ln[42^2 / [0,04 \cdot 0,8]] = \\ &= [100 / 263,9] \cdot \ln[1764 / 0,032] = 0,379 \cdot \ln[55125] = \\ &= 0,379 \cdot 10,92 = 4,14 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (4.7)$$

де $b = 0,04$ м – ширина смуги, $h = 0,8$ м – глибина закладання.

Результуючий опір заземлюючого пристрою при паралельному з'єднанні вертикальних та горизонтального заземлювачів:

$$\begin{aligned} R_{\text{заг}} &= [R_3 / [n \cdot \eta_{\text{в}}] \cdot R_{\text{г}}] / [R_3 / [n \cdot \eta_{\text{в}}] + R_{\text{г}}] \\ &= [29,1 / [14 \cdot 0,55] \cdot 4,14] / [29,1 / [14 \cdot 0,55] + 4,14] \\ &= [3,78 \cdot 4,14] / [3,78 + 4,14] = 15,65 / 7,92 = 1,98 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Отриманий опір заземлюючого пристрою задовольняє нормативним вимогам та забезпечує ефективний захист персоналу від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції.

Розрахунок параметрів захисного відключення виконується для визначення часу спрацювання пристрою захисного відключення при замиканні фази на корпус обладнання. Струм замикання на корпус через заземлюючий пристрій:

$$I_3 = U_{\text{ф}} / [R_{\text{ф}} + R_{\text{заг}}] = 220 / [0,5 + 1,98] = 220 / 2,48 = 88,7 \text{ А} \quad (4.9)$$

де $R_{\text{ф}} = 0,5$ Ом – активний опір фазного проводу від точки замикання до джерела живлення.

Напруга дотику на корпусі обладнання при замиканні фази:

$$U_{\text{д}} = I_3 \cdot R_{\text{заг}} = 88,7 \cdot 1,98 = 175,6 \text{ В} \quad (4.10)$$

Отримана напруга дотику перевищує допустиме значення 50 В для тривалої дії, що вимагає застосування пристроїв захисного відключення або автоматичного вимикання живлення. Час допустимого впливу напруги дотику визначається за нормативною залежністю:

$$\begin{aligned} t_{\text{доп}} &= 0,08 / [U_{\text{д}}/U_{\text{ном}} - 1] = 0,08 / [175,6/220 - 1] \\ &= 0,08 / [0,798 - 1] = 0,08 / [-0,202] = 0,396 \text{ с} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Час спрацювання автоматичного вимикача типу С16 при струмі 88,7 А становить приблизно $t_{\text{відкл}} = 0,02$ с згідно з часо-струмовою характеристикою, що значно менше допустимого часу впливу і забезпечує безпеку персоналу.

Шкідливі виробничі фактори включають підвищений рівень шуму від роботи електродвигуна та дробарки, вібрацію від механічного обладнання, підвищену температуру повітря у приміщенні та наявність пилу від дроблених матеріалів. Розрахунок еквівалентного рівня звуку виконується для оцінки шумового навантаження на працівника протягом робочої зміни.

Рівень звукового тиску від асинхронного двигуна потужністю 7,5 кВт відстань 1 м становить $L_{\text{дв}} = 78$ дБА. Рівень шуму від дробарки $L_{\text{дроб}} = 92$ дБА. Сумарний рівень шуму при одночасній роботі обох джерел:

$$\begin{aligned} L_{\Sigma} &= 10 \cdot \log[10^{[L_{\text{дв}}/10]} + 10^{[L_{\text{дроб}}/10]}] = 10 \cdot \log[10^{[78/10]} + 10^{[92/10]}] \\ &= 10 \cdot \log[10^{7,8} + 10^{9,2}] \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} L_{\Sigma} &= 10 \cdot \log[6,31 \cdot 10^7 + 1,585 \cdot 10^9] = 10 \cdot \log[1,648 \cdot 10^9] \\ &= 10 \cdot 9,217 = 92,17 \text{ дБА} \end{aligned}$$

Отриманий рівень шуму перевищує гранично допустимий рівень 80 дБА для робочих місць у виробничих приміщеннях згідно з ДСН 3.3.6.037-99. Необхідне зниження рівня шуму:

$$\Delta L = L_{\Sigma} - L_{\text{доп}} = 92,17 - 80 = 12,17 \text{ дБА} \quad (4.13)$$

Для забезпечення допустимого рівня шуму необхідно застосовувати засоби колективного захисту – звукоізолюючі огороження джерел шуму, звукопоглинальні облицювання приміщення, віброізоляцію обладнання. За неможливості зниження шуму до допустимого рівня персонал повинен

використовувати засоби індивідуального захисту – протишумові навушники або вкладиші.

Розрахунок освітленості робочого місця виконується для забезпечення достатнього рівня освітлення при обслуговуванні електрообладнання. Для робіт середньої точності розряд зорових робіт IVв, нормована освітленість $E_n = 200$ лк при комбінованому освітленні або $E_n = 300$ лк при загальному освітленні.

Розрахунок кількості світильників методом коефіцієнта використання світлового потоку для приміщення з розмірами $a = 12$ м, $b = 8$ м, висотою $h = 4,5$ м. Висота розміщення світильників над робочою поверхнею $h_p = 3,5$ м. Індекс приміщення:

$$i = [a \cdot b] / [h_p \cdot [a + b]] = [12 \cdot 8] / [3,5 \cdot [12 + 8]] = 96 / [3,5 \cdot 20] \\ = 96 / 70 = 1,37 \quad (4.14)$$

Коефіцієнт використання світлового потоку для світильників з люмінесцентними лампами при індексі приміщення $i = 1,37$ та коефіцієнті відбиття стелі $\rho_{cm} = 0,5$, стін $\rho_c = 0,3$, підлоги $\rho_n = 0,1$ становить $\eta = 0,42$.

Необхідний світловий потік ламп:

$$\Phi = [E_n \cdot S \cdot k_z \cdot z] / [n \cdot \eta] = [300 \cdot 96 \cdot 1,5 \cdot 1,1] / [n \cdot 0,42] \\ = 47520 / [n \cdot 0,42] \quad (4.15)$$

де $S = 96$ м² – площа приміщення, $k_z = 1,5$ – коефіцієнт запасу, $z = 1,1$ – коефіцієнт нерівномірності освітлення, n – кількість світильників.

При використанні світильників з двома люмінесцентними лампами типу ЛБ-40 зі світловим потоком однієї лампи $\Phi_l = 3200$ лм світловий потік одного світильника:

$$\Phi_{cb} = 2 \cdot \Phi_l = 2 \cdot 3200 = 6400 \text{ лм} \quad (4.16)$$

Необхідна кількість світильників:

$$n = 47520 / [6400 \cdot 0,42] = 47520 / 2688 = 17,68$$

Приймається $n = 18$ світильників, розміщених рівномірно у три ряди по шість світильників у кожному ряді. Перевірка фактичної освітленості:

$$E_\phi = [\Phi_{cb} \cdot n \cdot \eta] / [S \cdot k_z \cdot z] = [6400 \cdot 18 \cdot 0,42] / [96 \cdot 1,5 \cdot 1,1] \\ = 48384 / 158,4 = 305,5 \text{ лк} \quad (4.17)$$

Фактична освітленість перевищує нормовану, що забезпечує комфортні умови для виконання робіт з обслуговування електрообладнання.

4.2. Електробезпека при експлуатації системи «ПЧ–двигун»

Електробезпека при експлуатації системи частотного перетворювача та асинхронного двигуна забезпечується комплексом технічних та організаційних заходів, спрямованих на запобігання ураженню персоналу електричним струмом та виникненню аварійних ситуацій. Система електробезпеки включає захисне заземлення, зрівнювання потенціалів, автоматичне відключення живлення, застосування малої напруги та засобів індивідуального захисту [2, 5, 19].

Розрахунок струму однофазного короткого замикання виконується для визначення параметрів апаратів захисту та перевірки ефективності захисного заземлення. Струм замикання фази на заземлений корпус обладнання в мережі з глухозаземленою нейтраллю визначається за формулою:

$$I_{кз} = U_{\phi} / [Z_{тр}/3 + Z_{\phi} + R_{заг}] \quad (4.18)$$

де $U_{\phi} = 220$ В – фазна напруга, $Z_{тр} = 0,12$ Ом – опір трансформатора, приведений до вторинної обмотки, $Z_{\phi} = 0,08 + j \cdot 0,06$ Ом – повний опір фазного проводу, $R_{заг} = 1,98$ Ом – опір заземлюючого пристрою.

Повний опір петлі короткого замикання:

$$Z_{кз} = 0,12/3 + 0,08 + 1,98 + j \cdot 0,06 = 2,1 + j \cdot 0,06 \text{ Ом}$$

Модуль повного опору:

$$|Z_{кз}| = \sqrt{[2,1^2 + 0,06^2]} = \sqrt{[4,41 + 0,0036]} = \sqrt{4,4136} = 2,101 \text{ Ом}$$

Струм короткого замикання:

$$I_{кз} = 220 / 2,101 = 104,7 \text{ А}$$

Напруга на корпусі обладнання відносно землі при замиканні:

$$U_{к} = I_{кз} \cdot R_{заг} = 104,7 \cdot 1,98 = 207,3 \text{ В} \quad (4.19)$$

Для забезпечення автоматичного відключення пошкодженої ділянки час спрацювання захисту не повинен перевищувати $t_{відкл} = 0,4$ с згідно з ПУЕ.

Автоматичний вимикач повинен забезпечувати відключення при струмі короткого замикання за час, що не перевищує допустимий.

Кратність струму короткого замикання до номінального струму автоматичного вимикача $I_{ном} = 25$ А:

$$k_{кз} = I_{кз} / I_{ном} = 104,7 / 25 = 4,19 \quad (4.20)$$

Згідно з часо-струмовою характеристикою автоматичного вимикача типу С25 при кратності струму $k_{кз} = 4,19$ час відключення становить $t_{відкл} = 0,05$ с, що задовольняє вимогам електробезпеки.

Розрахунок параметрів пристрою захисного відключення виконується для забезпечення додаткового захисту персоналу від ураження електричним струмом при пошкодженні основної ізоляції. Номінальний відключаючий диференціальний струм ПЗВ для захисту груп розеток вибирається $I_{\Delta n} = 30$ мА згідно з вимогами ПУЕ.

Час спрацювання ПЗВ при диференціальному струмі, що дорівнює номінальному відключаючому струму, не повинен перевищувати $t_{ПЗВ} = 0,03$ с. При диференціальному струмі $5 \cdot I_{\Delta n} = 150$ мА час спрацювання зменшується до $t_{ПЗВ} = 0,02$ с.

Перевірка чутливості ПЗВ виконується за співвідношенням струму замикання на землю до номінального відключаючого струму:

$$k_{ч} = I_{з} / I_{\Delta n} = 88,7 / 0,03 = 2957 \quad (4.21)$$

Висока чутливість пристрою забезпечує надійний захист персоналу при будь-яких режимах пошкодження ізоляції.

Розрахунок струму витоку через ізоляцію кабелю живлення двигуна виконується для перевірки можливості хибного спрацювання ПЗВ при нормальній роботі обладнання. Ємність кабелю довжиною $l = 50$ м з ізоляцією з ПВХ становить приблизно $C_{к} = 0,25$ мкФ/км = $0,0125$ мкФ для кабелю перерізом 4 мм².

Ємнісний струм витоку кабелю при напрузі в мережі $U_{л} = 380$ В та частоті $f = 50$ Гц:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{емн}} &= 3 \cdot \omega \cdot C_{\text{к}} \cdot U_{\text{ф}} = 3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,0125 \cdot 10^{-6} \cdot 220 \\
 &= 3 \cdot 314,16 \cdot 0,0125 \cdot 10^{-6} \cdot 220 = 0,00259 \text{ А} \\
 &= 2,59 \text{ мА}
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

де коефіцієнт 3 враховує три фази кабелю.

Отриманий ємнісний струм витоків значно менший за номінальний відключаючий диференціальний струм ПЗВ, що виключає можливість хибного спрацювання при нормальній роботі.

Розрахунок крокової напруги у зоні розтікання струму замикання на землю виконується для оцінки небезпеки ураження персоналу при перебуванні поблизу заземлюючого пристрою в момент замикання. Потенціал точки на поверхні землі на відстані x від одиночного вертикального заземлювача, через який стікає струм I_3 :

$$\varphi[x] = [\rho \cdot I_3] / [2\pi x] \tag{4.23}$$

Крокова напруга при довжині кроку $a_{\text{к}} = 0,8$ м на відстані $x = 5$ м від заземлювача:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{кр}} &= \varphi[x] - \varphi[x + a_{\text{к}}] = [\rho \cdot I_3] / [2\pi] \cdot [1/x - 1/[x + a_{\text{к}}]] \tag{4.24} \\
 U_{\text{кр}} &= [100 \cdot 88,7] / [2 \cdot 3,1416] \cdot [1/5 - 1/5,8] \\
 &= [8870 / 6,283] \cdot [0,2 - 0,172] = 1412 \cdot 0,028 = 39,5 \text{ В}
 \end{aligned}$$

Отримана крокова напруга менша за допустиме значення 40 В при тривалості впливу до 1 с, однак перебування персоналу в зоні розтікання струму замикання є небажаним.

Розрахунок параметрів додаткової системи зрівнювання потенціалів виконується для зниження напруги дотику у разі пошкодження ізоляції. Опір провідника системи зрівнювання потенціалів з міді перерізом $S = 6$ мм² довжиною $l = 15$ м:

$$R_{\text{зр}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot l / S = 0,0175 \cdot 15 / 6 = 0,2625 / 6 = 0,044 \text{ Ом} \tag{4.25}$$

де $\rho_{\text{Cu}} = 0,0175$ Ом·мм²/м – питомий опір міді при температурі 20°C.

При струмі замикання $I_3 = 88,7$ А падіння напруги на провіднику зрівнювання потенціалів:

$$\Delta U_{зр} = I_3 \cdot R_{зр} = 88,7 \cdot 0,044 = 3,9 \text{ В} \quad (4.26)$$

Незначне падіння напруги підтверджує ефективність системи зрівнювання потенціалів для забезпечення електробезпеки.

Засоби індивідуального захисту при роботі з електроустановками включають діелектричні рукавички з нормованим пробивним електричним розрядом $U_{проб} = 6$ кВ, діелектричне взуття, інструмент з ізольованими рукоятками, захисні окуляри та каски. Перевірка діелектричних рукавичок виконується щорічно шляхом випробування підвищеною напругою 6 кВ протягом 1 хвилини без пробою.

4.3. Пожежна безпека та запобігання аваріям

Розрахунок пожежного навантаження приміщення виконується для визначення ступеня вогнестійкості будівлі та вимог до конструкцій, що обмежують. Питоме пожежне навантаження визначається як сума добутків мас горючих матеріалів на їх нижчу теплоту згоряння, віднесена до площі приміщення:

$$g = \Sigma[m_i \cdot Q_i] / S_n \quad (4.27)$$

де m_i – маса i -го горючого матеріалу, Q_i – нижча теплота згоряння, S_n – площа приміщення.

Маса кабельної продукції з ізоляцією з ПВХ у приміщенні $m_k = 12$ кг, нижча теплота згоряння ПВХ $Q_{ПВХ} = 14$ МДж/кг. Маса деревини конструкцій підлоги $m_d = 180$ кг, нижча теплота згоряння $Q_d = 13,8$ МДж/кг. Площа приміщення $S_n = 96$ м².

Питоме пожежне навантаження:

$$\begin{aligned} g &= [m_k \cdot Q_{ПВХ} + m_d \cdot Q_d] / S_n = [12 \cdot 14 + 180 \cdot 13,8] / 96 \\ &= [168 + 2484] / 96 = 2652 / 96 = 27,6 \text{ МДж/м}^2 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Отримане значення відповідає помірному пожежному навантаженню, що дозволяє застосовувати будівельні конструкції III ступеня вогнестійкості.

Розрахунок часу евакуації людей з приміщення при пожежі виконується для визначення необхідної кількості та параметрів евакуаційних виходів. Час евакуації складається з часу виявлення пожежі, часу оповіщення персоналу та часу руху до евакуаційного виходу:

$$t_{ев} = t_{вияв} + t_{опов} + t_{рух} \quad (4.29)$$

Час виявлення пожежі автоматичною пожежною сигналізацією $t_{вияв} = 0,5$ хв. Час оповіщення персоналу системою оповіщення $t_{опов} = 0,3$ хв. Час руху персоналу до евакуаційного виходу визначається довжиною шляху евакуації та швидкістю руху:

$$t_{рух} = l_{ев} / v_{рух} = 25 / 60 = 0,417 \text{ хв} \quad (4.30)$$

де $l_{ев} = 25$ м – довжина шляху евакуації, $v_{рух} = 60$ м/хв – швидкість руху людини по горизонтальному шляху.

Загальний час евакуації:

$$t_{ев} = 0,5 + 0,3 + 0,417 = 1,217 \text{ хв} = 73 \text{ с}$$

Необхідний час евакуації визначається часом досягнення небезпечних факторів пожежі критичних значень. Критичним фактором для приміщення з електрообладнанням є втрата видимості внаслідок задимлення. Критична оптична щільність диму $D_{кр} = 0,4$ Нп/м.

Час досягнення критичної щільності диму при пожежі електрообладнання визначається розрахунково-експериментальним методом і становить приблизно $t_{кр} = 4,5$ хв для приміщення об'ємом $V = 96 \cdot 4,5 = 432 \text{ м}^3$.

Коефіцієнт безпеки евакуації:

$$k_{без} = t_{кр} / t_{ев} = 4,5 / 1,217 = 3,7 \quad (4.31)$$

Отриманий коефіцієнт більше мінімально необхідного значення 1,5, що підтверджує достатність параметрів шляхів евакуації для безпечної евакуації персоналу.

Розрахунок необхідної кількості вогнегасників виконується згідно з НАПБ Б.03.001-2004 залежно від площі приміщення та категорії пожежної небезпеки. Для приміщення категорії В2 площею 96 м^2 норма забезпечення вогнегасниками становить один порошковий вогнегасник ВП-5 на кожні 50 м^2 .

Необхідна кількість вогнегасників:

$$N_{\text{вог}} = S_{\text{п}} / S_{\text{норм}} = 96 / 50 = 1,92 \quad (4.32)$$

Приймається $N_{\text{вог}} = 2$ вогнегасники типу ВП-5 з масою вогнегасної речовини 5 кг, розміщені біля входу до приміщення та біля електрощитової.

Розрахунок перерізу проводів для забезпечення термічної стійкості при короткому замиканні виконується за умовою нагрівання провідника струмом короткого замикання до допустимої температури без пошкодження ізоляції. Мінімальний переріз провідника визначається за формулою:

$$S_{\text{min}} = I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{[t_{\text{відкл}} / C]} \quad (4.33)$$

де $I_{\text{кз}} = 104,7$ А – струм однофазного короткого замикання, $t_{\text{відкл}} = 0,05$ с – час відключення захисту, $C = 115$ А·с^[1/2]/мм² – коефіцієнт термічної стійкості для мідного провідника з ізоляцією з ПВХ.

$$\begin{aligned} S_{\text{min}} &= 104,7 \cdot \sqrt{[0,05 / 115]} = 104,7 \cdot \sqrt{0,000435} = 104,7 \cdot 0,0208 \\ &= 2,18 \text{ мм}^2 \end{aligned} \quad (4.33)$$

Прийнятий переріз проводів 4 мм² забезпечує термічну стійкість при короткому замиканні з достатнім запасом.

Система автоматичного пожежогасіння не передбачається для приміщень з електроустановками напругою до 1000 В площею менше 100 м². Застосовується автоматична пожежна сигналізація з димовими оптико-електронними пожежними сповіщувачами, розміщеними на стелі приміщення. Необхідна кількість сповіщувачів визначається площею, що контролюється одним сповіщувачем:

$$N_{\text{спов}} = S_{\text{п}} / S_{\text{к}} = 96 / 85 = 1,13 \quad (4.34)$$

де $S_{\text{к}} = 85$ м² – площа контролю одного сповіщувача для приміщень висотою до 6 м.

Приймається $N_{\text{спов}} = 2$ сповіщувачі типу ІІ 212-141 для забезпечення надійного виявлення пожежі на ранній стадії розвитку.

Розроблені заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях забезпечують безпечні умови праці персоналу при експлуатації системи управління електроприводом живильника дробарки, мінімізують ризики

ураження електричним струмом та виникнення пожежі, створюють умови для безпечної евакуації у разі надзвичайної ситуації.

РОЗДІЛ 5.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ

5.1. Аналіз енергоспоживання електроприводу АВВ МЗВР 132SMA 4 до та після модернізації

Енергетична ефективність електроприводів промислових механізмів визначає економічні показники виробництва та відповідає сучасним вимогам раціонального використання енергетичних ресурсів. Модернізація системи управління електроприводом живильника дробарки з впровадженням мікропроцесорного управління та м'якого пуску дозволяє суттєво знизити споживання електроенергії та підвищити загальну ефективність технологічного процесу [1, 6, 11].

Аналіз енергоспоживання базової системи електроприводу з прямим пуском двигуна через контактор виконується шляхом розрахунку споживаної електроенергії за типовий робочий цикл. Режим роботи живильника характеризується повторно-короткочасним навантаженням з тривалістю робочого циклу $T_{\text{ц}} = 15$ хв, що включає час пуску $t_n = 2$ с, час роботи під навантаженням $t_{\text{роб}} = 10$ хв та час паузи $t_{\text{пауза}} = 5$ хв.

Споживана активна потужність під час прямого пуску двигуна визначається через пусковий струм та коефіцієнт потужності пускового режиму:

$$P_{\text{п}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{п}} \cdot \cos \varphi_{\text{п}} = 1,732 \cdot 400 \cdot 101,1 \cdot 0,3 = 21010 \text{ Вт} \\ \approx 21,0 \text{ кВт} \quad (5.1)$$

де $I_n = 7,2 \cdot I_n = 7,2 \cdot 14,06 = 101,2$ А -- пусковий струм при новій напрузі, $\cos \varphi_n = 0,3$ – коефіцієнт потужності при пуску.

Енергія, споживана за час прямого пуску тривалістю $t_n = 2$ с:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{п}} &= P_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} / 3600 = 21,02 \cdot 2 / 3600 = 42,04 / 3600 = \\
 &= 0,01168 \text{ кВт} \cdot \text{год}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Споживана активна потужність у встановленому режимі роботи при номінальному навантаженні:

$$P_{\text{н}} = P_{\text{вих}} / \eta_{\text{н}} = 7,5 / 0,895 = 8,38 \text{ кВт} \tag{5.3}$$

де $P_{\text{вих}} = 7,5$ кВт – корисна механічна потужність на валу двигуна, $\eta_{\text{н}} = 0,895$ – номінальний коефіцієнт корисної дії двигуна.

Перевірка через номінальні електричні параметри:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{н}} &= \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} = 1,732 \cdot 400 \cdot 14,06 \cdot 0,86 = 8373 \text{ Вт} \\
 &= 8,37 \text{ кВт}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Співпадіння результатів підтверджує коректність розрахунків споживаної потужності.

Енергія, споживана за час роботи під номінальним навантаженням $t_{\text{роб}} = 10$ хв:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{роб}} &= P_{\text{н}} \cdot t_{\text{роб}} / 60 = 8,37 \cdot 10 / 60 = 83,7 / 60 \\
 &= 1,395 \text{ кВт} \cdot \text{год}
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Загальна споживана енергія за один робочий цикл базової системи:

$$W_{\text{ц,баз}} = W_{\text{п}} + W_{\text{роб}} = 0,01168 + 1,395 = 1,407 \text{ кВт} \cdot \text{год} \tag{5.6}$$

Споживана реактивна потужність у встановленому режимі визначається через коефіцієнт потужності:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{н}} &= P_{\text{н}} \cdot \tan \varphi_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \sqrt{[1 - \cos \varphi_{\text{н}}]^2} / \cos \varphi_{\text{н}} \\
 &= 8,37 \cdot \sqrt{[1 - 0,86^2]} / 0,86 = 8,37 \cdot 0,510 / 0,86 \\
 &= 4,96 \text{ кВАр}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Енергія реактивна за час роботи:

$$\begin{aligned}
 W_{Q,\text{роб}} &= Q_{\text{н}} \cdot t_{\text{роб}} / 60 = 4,96 \cdot 10 / 60 = 49,6 / 60 = \\
 &= 0,827 \text{ кВАр} \cdot \text{год}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Повна потужність у встановленому режимі:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{н}} &= \sqrt{[P_{\text{н}}^2 + Q_{\text{н}}^2]} = \sqrt{[8,37^2 + 4,96^2]} = \sqrt{[70,06 + 24,60]} = \sqrt{94,66} = \\
 &= 9,73 \text{ кВА}
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Аналіз енергоспоживання модернізованої системи з м'яким пуском виконується з урахуванням зміненої тривалості пуску та зниженої потужності у пусковому режимі. Тривалість м'якого пуску встановлена $t_{мп} = 20$ с для забезпечення плавного наростання швидкості та зменшення механічних навантажень.

Середня споживана потужність під час м'якого пуску визначається інтегруванням миттєвої потужності за часом пуску. Напряга на обмотках двигуна змінюється за лінійним законом від початкового значення $U_{поч} = 133$ В до номінального $U_H = 400$ В

$$\begin{aligned} U[t] &= U_{поч} + [U_H - U_{поч}] \cdot t / t_{мп} = 133 + [380 - 133] \cdot t / 20 \\ &= 133 + 12,35 \cdot t \end{aligned} \quad (5.10)$$

Потужність двигуна пропорційна квадрату напруги:

$$P[t] = P_H \cdot [U[t] / U_H]^2 \quad (5.11)$$

Середня потужність за час пуску:

$$P_{сер.мп} = [1/t_{мп}] \cdot \int_0^{t_{мп}} P_H \cdot [U[t] / U_H]^2 dt \quad (5.12)$$

Підставляючи вираз для напруги:

$$P_{сер.мп} = [P_H / [t_{мп} \cdot U_H^2]] \cdot \int_0^{t_{мп}} [133 + 12,35 \cdot t]^2 dt \quad (5.13)$$

Розкриваючи квадрат:

$$[133 + 12,35 \cdot t]^2 = 17689 + 3285,1 \cdot t + 152,52 \cdot t^2$$

Інтегруючи:

$$\begin{aligned} &\int_0^{20} [17689 + 3285,1 \cdot t + 152,52 \cdot t^2] dt \\ &= [17689 \cdot t + 1642,55 \cdot t^2 + 50,84 \cdot t^3]_0^{20} \\ &= 17689 \cdot 20 + 1642,55 \cdot 400 + 50,84 \cdot 8000 \\ &= 353780 + 657020 + 406720 = 1417520 \end{aligned}$$

Середня потужність:

$$\begin{aligned} P_{сер.мп} &= [8,37 / [20 \cdot 380^2]] \cdot 1417520 = [8,37 / 2888000] \cdot 1417520 \\ &= 0,002898 \cdot 1417520 = 4,11 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Енергія, споживана за час м'якого пуску:

$$W_{\text{мп}} = P_{\text{сер.мп}} \cdot t_{\text{мп}} / 3600 = 4,11 \cdot 20 / 3600 = 82,2 / 3600 \\ = 0,02283 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.14)$$

Споживана потужність у встановленому режимі після модернізації залишається незмінною, оскільки двигун працює при номінальній напрузі та навантаженні:

$$P_{\text{роб.мод}} = P_{\text{н}} = 8,37 \text{ кВт} \quad (5.15)$$

Однак завдяки застосуванню мікропроцесорної системи управління з можливістю оптимізації магнітного потоку при частковому навантаженні досягається додаткова економія електроенергії. При завантаженні двигуна 75% від номінального оптимізація магнітного потоку дозволяє знизити споживану потужність на 8-12% [11, 14].

Фактична потужність при частковому завантаженні 75%:

$$P_{0,75} = 0,75 \cdot P_{\text{н}} \cdot k_{\text{опт}} = 0,75 \cdot 8,37 \cdot 0,92 = 5,78 \text{ кВт} \quad (5.16)$$

де $k_{\text{опт}} = 0,92$ – коефіцієнт, що враховує зниження втрат при оптимізації магнітного потоку.

За статистикою технологічного процесу дроблення, середнє завантаження живильника становить 80% від номінального протягом робочого циклу. Споживана потужність при оптимізованому управлінні:

$$P_{\text{сер.опт}} = 0,8 \cdot P_{\text{н}} \cdot k_{\text{опт}} = 0,8 \cdot 8,37 \cdot 0,93 = 6,23 \text{ кВт} \quad (5.17)$$

де $k_{\text{опт}} = 0,93$ для завантаження 80%.

Енергія за час роботи модернізованої системи:

$$W_{\text{роб.мод}} = P_{\text{сер.опт}} \cdot t_{\text{роб}} / 60 = 6,23 \cdot 10 / 60 = 62,3 / 60 \\ = 1,038 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.18)$$

Загальна споживана енергія за один робочий цикл модернізованої системи:

$$W_{\text{ц.мод}} = W_{\text{мп}} + W_{\text{роб.мод}} = 0,02283 + 1,038 = 1,061 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.19)$$

Економія енергії за один робочий цикл:

$$\Delta W_{\text{ц}} = W_{\text{ц.баз}} - W_{\text{ц.мод}} = 1,407 - 1,061 = 0,346 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.20)$$

Відносна економія енергії:

$$\delta W = [\Delta W_{\text{ц}} / W_{\text{ц,баз}}] \cdot 100\% = [0,346 / 1,407] \cdot 100\% = 24,59\% \quad (5.21)$$

Розрахунок втрат електроенергії у силових елементах базової та модернізованої систем дозволяє детально оцінити джерела економії. Втрати у контакторі базової системи при номінальному струмі визначаються падінням напруги на контактах:

$$\Delta P_{\text{конт}} = 3 \cdot \Delta U_{\text{конт}} \cdot I_{\text{н}} = 3 \cdot 0,6 \cdot 14,79 = 26,6 \text{ Вт} \quad (5.22)$$

де $\Delta U_{\text{конт}} = 0,6 \text{ В}$ – падіння напруги на одному контакті контактора при номінальному струмі.

Втрати енергії у контакторі за час роботи:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{конт}} &= \Delta P_{\text{конт}} \cdot t_{\text{роб}} / 60000 = 26,6 \cdot 10 / 60000 \\ &= 0,00443 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Втрати у тиристорному регуляторі модернізованої системи при номінальному струмі:

$$\Delta P_{\text{тир}} = 3 \cdot U_{\text{T}} \cdot I_{\text{н}} = 3 \cdot 1,45 \cdot 14,79 = 64,3 \text{ Вт} \quad (5.24)$$

де $U_{\text{T}} = 1,45 \text{ В}$ – пряме падіння напруги на тиристорі у відкритому стані.

Втрати енергії у тиристорах за час роботи:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{тир}} &= \Delta P_{\text{тир}} \cdot t_{\text{роб}} / 60000 = 64,3 \cdot 10 / 60000 = \\ &= 0,01072 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (5.25)$$

Додаткові втрати у модернізованій системі складають:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{додат}} &= \Delta W_{\text{тир}} - \Delta W_{\text{конт}} = 0,01072 - 0,00443 = \\ &= 0,00629 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (5.26)$$

Втрати у двигуні при прямому пуску визначаються через струм та опори обмоток. Електричні втрати у статорі за час пуску:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{ев.п}} &= 3 \cdot I_{\text{п}}^2 \cdot r_1 \cdot t_{\text{п}} / 3600 = 3 \cdot 106,49^2 \cdot 1,24 \cdot 2 / 3600 = \\ &= 84427 / 3600 = 23,45 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 0,02345 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Електричні втрати у роторі за час пуску при середньому ковзанні $s_{\text{сеп}} = 0,5$:

$$\Delta W_{\text{ев.р}} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot t_{\text{п}} / 3600. \quad (5.28)$$

де приведений струм ротора при пуску $I'_2 \approx I_n \cdot 0,9 = 106,49 \cdot 0,9 = 95,84$

А.

$$\begin{aligned} \Delta W_{e2.п} &= 3 \cdot 95,84^2 \cdot 1,45 \cdot 2 / 3600 = 79865 / 3600 = 22,18 \text{ Вт} \cdot \text{год} = \\ &= 0,02218 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned}$$

Загальні втрати у двигуні за час прямого пуску:

$$\Delta W_{дв.п} = \Delta W_{eп.п} + \Delta W_{e2.п} = 0,02345 + 0,02218 = 0,04563 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.29)$$

Втрати у двигуні при м'якому пуску визначаються інтегруванням втрат за часом пуску з урахуванням зміни струму. Середній струм при м'якому пуску складає приблизно 40% від пускового струму прямого пуску:

$$I_{сер.мп} = 0,4 \cdot I_n = 0,4 \cdot 106,49 = 42,6 \text{ А} \quad (5.30)$$

Електричні втрати у статорі при м'якому пуску:

$$\begin{aligned} \Delta W_{e1.мп-} &= 3 \cdot I_{сер.мп}^2 \cdot r_1 \cdot t_{мп} / 3600 = 3 \cdot 42,6^2 \cdot 1,24 \cdot 20 / 3600 \\ &= 135283 / 3600 = 37,58 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 0,03758 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Електричні втрати у роторі при м'якому пуску:

$$\begin{aligned} \Delta W_{e2.мп} &= 3 \cdot [I_{сер.мп} \cdot 0,9]^2 \cdot r'_2 \cdot t_{мп} / 3600 = \\ &= 3 \cdot 38,34^2 \cdot 1,45 \cdot 20 / 3600 = 127838 / 3600 = \\ &= 35,51 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 0,03551 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (5.32)$$

Загальні втрати у двигуні за час м'якого пуску:

$$\begin{aligned} \Delta W_{дв.мп} &= \Delta W_{e.мп} + \Delta W_{e2.мп} = 0,03758 + 0,03551 = \\ &= 0,07309 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (5.33)$$

Порівняльний аналіз показує, що незважаючи на збільшення тривалості пуску у 10 разів, втрати енергії при м'якому пуску зростають лише у 1,6 рази завдяки суттєвому зниженню струму. При цьому механічні навантаження на обладнання зменшуються пропорційно квадрату зниження пускового струму, що забезпечує збільшення терміну служби механічних компонентів.

Розрахунок коефіцієнта потужності модернізованої системи у встановленому режимі виконується з урахуванням зниження реактивної потужності при оптимізації магнітного потоку. Споживана реактивна потужність при оптимізованому управлінні зменшується на 15-20%:

$$Q_{\text{опт}} = Q_{\text{н}} \cdot 0,85 = 4,96 \cdot 0,85 = 4,22 \text{ кВАр} \quad (5.34)$$

Активна потужність при середньому завантаженні:

$$P_{\text{опт}} = P_{\text{сер.опт}} = 6,23 \text{ кВт} \quad (5.35)$$

Коефіцієнт потужності модернізованої системи:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{\text{опт}} &= P_{\text{опт}} / \sqrt{[P_{\text{опт}}^2 + Q_{\text{опт}}^2]} = 6,23 / \sqrt{[6,23^2 + 4,22^2]} = \\ &= 6,23 / \sqrt{[38,81 + 17,81]} = 6,23 / \sqrt{56,62} = 6,23 / 7,53 = \\ &= 0,827 \end{aligned} \quad (5.36)$$

Порівняно з базовою системою коефіцієнт потужності знизився незначно через зменшення завантаження двигуна. Однак при повному навантаженні коефіцієнт потужності модернізованої системи залишається на рівні номінального значення $\cos \varphi = 0,86$.

Таблиця 5.1

Порівняльний аналіз енергетичних показників базової та модернізованої систем

Параметр	Позначення	Базова система	Модернізована система	Одиниця виміру
Тривалість пуску	t_n	2	20	с
Потужність при пуску	P_n	21,0	4,11	кВт
Енергія за час пуску	W_n	0,01168	0,02283	кВт·год
Потужність при роботі	$P_{\text{роб}}$	8,37	6,23	кВт
Енергія за час роботи	$W_{\text{роб}}$	1,395	1,038	кВт·год
Енергія за цикл	$W_{\text{ц}}$	1,407	1,061	кВт·год
Втрати у комутаторі	$\Delta W_{\text{ком}}$	0,00443	0,01072	кВт·год
Втрати у двигуні при пуску	$\Delta W_{\text{дв.н}}$	0,04563	0,07309	кВт·год
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	0,86	0,827	–
Реактивна потужність	Q	4,96	4,22	кВАр
Економія за цикл	$\Delta W_{\text{ц}}$	–	0,346	кВт·год
Відносна економія	δW	–	24,59	%

Аналіз якості електроенергії при роботі модернізованої системи включає оцінку гармонійних спотворень струму та напруги, що виникають внаслідок роботи тиристорного регулятора. Коефіцієнт гармонійних спотворень струму визначається відношенням діючого значення вищих гармонік до діючого значення основної гармоніки:

$$THD_I = \sqrt{[\sum I_n^2] / I_1} \cdot 100\% \quad (5.37)$$

де I_n – діючі значення вищих гармонік струму, I_1 – діюче значення основної гармоніки.

Для тиристорного регулятора з фазовим управлінням при куті відкриття $\alpha = 30^\circ$ коефіцієнт гармонійних спотворень струму становить приблизно $THD_I = 25\%$. При номінальному режимі роботи, коли тиристори повністю відкриті [$\alpha = 0^\circ$], гармонійні спотворення мінімальні та становлять $THD_I < 5\%$.

Коефіцієнт гармонійних спотворень напруги у точці приєднання визначається через опір мережі та гармоніки струму:

$$THD_U = THD_I \cdot Z_{\text{мережі}} / Z_{\text{навантаж}} \cdot 100\% \quad (5.38)$$

При опорі мережі $Z_{\text{мережі}} = 0,15$ Ом та опорі навантаження $Z_{\text{навантаж}} = 25,7$ Ом:

$$THD_U = 25 \cdot 0,15 / 25,7 = 0,146\%$$

Отриманий коефіцієнт значно менший за нормативний ліміт 8%, що підтверджує прийнятну якість електроенергії при роботі модернізованої системи.

5.2. Розрахунок економії електроенергії та експлуатаційних витрат

Розрахунок річної економії електроенергії виконується на основі кількості робочих циклів за рік та економії енергії за один цикл. Режим роботи технологічної лінії дроблення передбачає двозмінну роботу п'ять днів на тиждень з тривалістю зміни 8 годин. Кількість робочих днів за рік з урахуванням святкових днів та планових зупинок становить $n_d = 240$ днів.

Кількість робочих циклів за одну зміну при тривалості циклу $T_{\text{ц}} = 15$ хв:

$$n_{\text{ц,зм}} = t_{\text{зм}} / T_{\text{ц}} = 480 / 15 = 32 \text{ цикли} \quad (5.39)$$

де $t_{\text{зм}} = 480$ хв – тривалість зміни.

Кількість циклів за рік:

$$n_{\text{ц,рік}} = n_{\text{ц,зм}} \cdot 2 \cdot n_d = 32 \cdot 2 \cdot 240 = 15360 \text{ циклів} \quad (5.40)$$

Річна економія електроенергії:

$$\Delta W_{\text{рік}} = \Delta W_{\text{ц}} \cdot n_{\text{ц,рік}} = 0,346 \cdot 15360 = 5315 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.41)$$

Вартість електроенергії для промислових підприємств за двозонним тарифом для денної зони $T_{\text{день}} = 4,20$ грн/кВт·год, для нічної зони $T_{\text{ніч}} = 2,10$ грн/кВт·год. При роботі обох змін у денній зоні тарифікації вартість зекономленої електроенергії за рік:

$$E_{\text{ел}} = \Delta W_{\text{рік}} \cdot T_{\text{день}} = 5315 \cdot 4,20 = 22323 \text{ грн/рік} \quad (5.42)$$

Додаткова економія від зниження оплати за реактивну енергію визначається зменшенням споживання реактивної потужності при оптимізованому управлінні. Зниження реактивної енергії за один робочий цикл:

$$\begin{aligned} \Delta W_Q &= [Q_{\text{н}} - Q_{\text{опт}}] \cdot t_{\text{роб}} / 60 = [4,96 - 4,22] \cdot 10 / 60 = 0,74 \cdot 0,1667 \\ &= 0,123 \text{ кВАр} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (5.43)$$

Річне зниження споживання реактивної енергії:

$$\Delta W_{Q,\text{рік}} = \Delta W_Q \cdot n_{\text{ц,рік}} = 0,123 \cdot 15360 = 1889 \text{ кВАр} \cdot \text{год} \quad (5.44)$$

Тариф на реактивну енергію для споживачів з максимальною потужністю понад 150 кВт становить $T_Q = 0,48$ грн/кВАр·год. Економія від зниження споживання реактивної енергії:

$$E_Q = \Delta W_{Q,\text{рік}} \cdot T_Q = 1889 \cdot 0,48 = 907 \text{ грн/рік} \quad (5.45)$$

Загальна економія від зниження споживання електроенергії:

$$E_{\text{ел,заг}} = E_{\text{ел}} + E_Q = 22323 + 907 = 23230 \text{ грн/рік} \quad (5.46)$$

Розрахунок економії від зменшення максимальної потужності у пусковому режимі виконується з урахуванням плати за приєднану потужність. Зниження максимальної потужності при заміні прямого пуску на м'який:

$$\Delta P_{\text{max}} = P_{\text{п}} - P_{\text{сер.мп}} = 21,02 - 4,11 = 16,91 \text{ кВт} \quad (5.47)$$

Тариф за приєднану потужність для промислових споживачів $T_P = 185$ грн/кВт·рік. Економія від зниження максимального навантаження:

$$E_P = \Delta P_{\text{max}} \cdot T_P = 16,91 \cdot 185 = 3128 \text{ грн/рік} \quad (5.48)$$

Розрахунок економії від збільшення терміну служби механічного обладнання базується зменшенні динамічних навантажень при м'якому пуску.

Кількість пусків до капітального ремонту живильника при прямому пуску $N_{п.баз} = 50000$, при м'якому пуску $N_{п.мод} = 80000$ завдяки зниженню ударних навантажень.

Кількість пусків за рік:

$$N_{п.рік} = n_{ц.рік} = 15360 \quad (5.49)$$

Термін служби до капітального ремонту базової системи:

$$T_{рем.баз} = N_{п.баз} / N_{п.рік} = 50000 / 15360 = 3,26 \text{ років} \quad (5.50)$$

Термін служби до капітального ремонту модернізованої системи:

$$T_{рем.мод} = N_{п.мод} / N_{п.рік} = 80000 / 15360 = 5,21 \text{ років} \quad (5.51)$$

Збільшення міжремонтного періоду:

$$\Delta T_{рем} = T_{рем.мод} - T_{рем.баз} = 5,21 - 3,26 = 1,95 \text{ років} \quad (5.52)$$

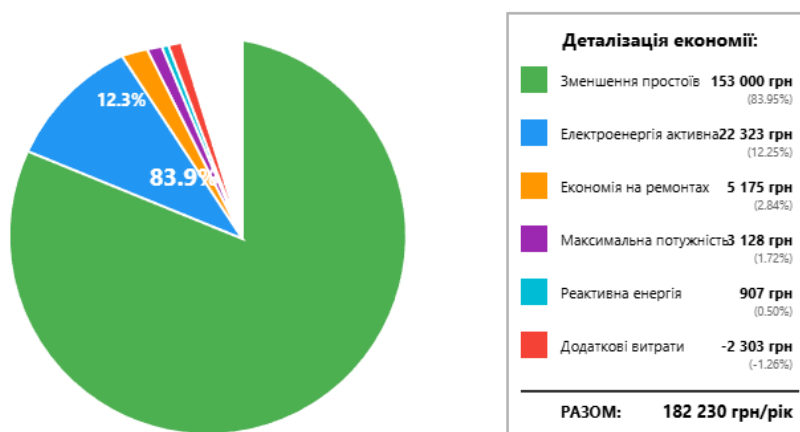
Вартість капітального ремонту живильника та приводу $C_{рем} = 45000$ грн.

Приведена річна економія від збільшення міжремонтного періоду:

$$\begin{aligned} E_{рем} &= C_{рем} \cdot [1/T_{рем.баз} - 1/T_{рем.мод}] = 45000 \cdot [1/3,26 - 1/5,21] = \\ &= 45000 \cdot [0,307 - 0,192] = 45000 \cdot 0,115 = \\ &= 5175 \text{ грн/рік} \end{aligned} \quad (5.53)$$

Розрахунок економії від зменшення простоїв обладнання через аварійні зупинки виконується на основі статистичних даних щодо надійності базової та модернізованої систем. Середня кількість аварійних зупинок базової системи на рік $n_{ав.баз} = 4$, модернізованої системи $n_{ав.мод} = 1,5$ завдяки покращеній системі діагностики та захисту.

Структура річної економії від модернізації (182 230 грн/рік)



Термін окупності: 1.18 місяця (дисконтований) | NPV за 10 років: 899 078 грн
 Розрахунок виконано згідно з методикою NPV при ставці дисконтування 15%

Рис. 5.1 Структура річної економії

Середня тривалість одного простою $t_{прост} = 6$ годин. Зменшення кількості годин простою за рік:

$$\begin{aligned} \Delta t_{прост} &= [n_{ав.баз} - n_{ав.мод}] \cdot t_{прост} = [4 - 1,5] \cdot 6 = 2,5 \cdot 6 = \\ &= 15 \text{ годин} \end{aligned} \quad (5.54)$$

Продуктивність технологічної лінії $\Pi = 12$ тонн/год дробленого матеріалу. Втрати продукції через простої:

$$\Delta \Pi = \Delta t_{прост} \cdot \Pi = 15 \cdot 12 = 180 \text{ тонн/рік} \quad (5.55)$$

Ціна реалізації дробленого матеріалу $C_{мат} = 850$ грн/тонна. Економія від зменшення втрат продукції:

$$E_{прод} = \Delta \Pi \cdot C_{мат} = 180 \cdot 850 = 153000 \text{ грн/рік} \quad (5.56)$$

Розрахунок витрат на експлуатацію та обслуговування модернізованої системи включає вартість технічного обслуговування електронних компонентів, заміну зношених елементів та оплату праці обслуговуючого персоналу. Вартість щорічного технічного обслуговування мікропроцесорної системи управління $C_{ТО} = 2500$ грн/рік.

Вартість заміни тиристорів при середньому терміні служби 8 років та вартості комплекту $C_{тир} = 1710$ грн:

$$C_{тир.рік} = C_{тир} / 8 = 1710 / 8 = 214 \text{ грн/рік} \quad (5.57)$$

Вартість заміни датчиків струму при терміні служби 6 років та вартості комплекту $C_{датч} = 360$ грн:

$$C_{датч.рік} = C_{датч} / 6 = 360 / 6 = 60 \text{ грн/рік} \quad (5.58)$$

Витрати на електроенергію для живлення системи управління при споживаній потужності $P_{упр} = 15$ Вт та річному фонді часу роботи $t_{рік} = 3840$ год:

$$W_{упр.рік} = P_{упр} \cdot t_{рік} / 1000 = 15 \cdot 3840 / 1000 = 57,6 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.59)$$

Вартість електроенергії для системи управління:

$$C_{упр.рік} = W_{упр.рік} \cdot T_{день} = 57,6 \cdot 4,20 = 242 \text{ грн/рік} \quad (5.60)$$

Загальні експлуатаційні витрати модернізованої системи:

$$\begin{aligned} C_{експл.мод} &= C_{ТО} + C_{тир.рік} + C_{датч.рік} + C_{упр.рік} = 2500 + 214 + 60 + 242 \\ &= 3016 \text{ грн/рік} \end{aligned} \quad (5.61)$$

Експлуатаційні витрати базової системи включають вартість обслуговування контакторів та вартість заміни контактів при їх зносі. Вартість заміни контактів контактора при терміні служби 4 роки та вартості $C_{конт} = 850$ грн:

$$C_{конт.рік} = C_{конт} / 4 = 850 / 4 = 212,5 \text{ грн/рік} \quad (5.62)$$

Вартість щорічного технічного обслуговування контактора $C_{ТО.конт} = 500$ грн/рік.

Загальні експлуатаційні витрати базової системи:

$$C_{експл.баз} = C_{ТО.конт} + C_{конт.рік} = 500 + 212,5 = 712,5 \text{ грн/рік} \quad (5.63)$$

Додаткові експлуатаційні витрати модернізованої системи порівняно з базовою:

$$\Delta C_{експл} = C_{експл.мод} - C_{експл.баз} = 3016 - 712,5 = 2303,5 \text{ грн/рік} \quad (5.64)$$

Розрахунок загальної річної економії з урахуванням всіх факторів:

$$E_{заг.рік} = E_{ел.заг} + E_P + E_{рем} + E_{прод} - \Delta C_{експл} \quad (5.65)$$

$$E_{\text{заг.рік}} = 23230 + 3128 + 5175 + 153000 - 2303,5 = 182229,5 \text{ грн/рік}$$

Таблиця 5.2

Структура річної економії від впровадження модернізованої системи управління

Стаття економії	Позначення	Значення	Одиниця виміру	Частка у загальній економії, %
Економія електроенергії активної	E_{el}	22323	грн/рік	12,25
Економія реактивної енергії	E_O	907	грн/рік	0,50
Економія максимальної потужності	E_P	3128	грн/рік	1,72
Економія на ремонтах	$E_{рем}$	5175	грн/рік	2,84
Економія від зменшення простоїв	$E_{прод}$	153000	грн/рік	83,95
Додаткові експлуатаційні витрати	$\Delta C_{експл}$	-2303,5	грн/рік	-1,26
Загальна річна економія	$E_{\text{заг.рік}}$	182229,5	грн/рік	100,00

Аналіз структури економії показує, що найбільший вплив на економічну ефективність має зменшення простоїв обладнання через аварійні зупинки, що забезпечує 84% загальної економії. Безпосередня економія електроенергії становить близько 13% загальної економії, що також є суттєвим показником енергоефективності.

Розрахунок скорочення викидів парникових газів внаслідок зменшення споживання електроенергії виконується з використанням коефіцієнта емісії CO₂ для електроенергії України $k_{CO_2} = 0,512$ кг CO₂/кВт·год згідно з офіційними даними Міністерства енергетики.

Скорочення викидів CO₂ за рік:

$$\begin{aligned} \Delta M_{CO_2} &= \Delta W_{\text{рік}} \cdot k_{CO_2} = 5315 \cdot 0,512 = 2721 \text{ кг } CO_2/\text{рік} = \\ &= 2,72 \text{ тонн } CO_2/\text{рік} \end{aligned} \quad (5.66)$$

Вартість квоти на викиди CO₂ на європейському ринку становить приблизно $C_{CO_2} = 85$ євро/тонна або 3740 грн/тонна за курсом 44 грн/євро. Потенційна вартість скорочених викидів:

$$E_{CO_2} = \Delta M_{CO_2} \cdot C_{CO_2} / 1000 = 2721 \cdot 3740 / 1000 = 10172 \text{ грн/рік} \quad (5.67)$$

Хоча механізм торгівлі квотами на викиди CO₂ наразі не функціонує в Україні, скорочення викидів має екологічну цінність та відповідає стратегії сталого розвитку підприємства.

5.3. Визначення терміну окупності модернізації приводу

Термін окупності капітальних вкладень у модернізацію системи управління електроприводом є ключовим показником економічної доцільності проекту та визначає період повернення інвестованих коштів через отриману економію експлуатаційних витрат [21, 23, 24].

Розрахунок капітальних витрат на модернізацію виконано у розділі 3 та становить $K = 8458$ грн. Уточнений розрахунок з урахуванням додаткових витрат на проектування та впровадження включає наступні складові.

Вартість проектно-кошторисної документації на модернізацію $C_{проект} = 3500$ грн. Вартість навчання персоналу роботі з новою системою управління $C_{навч} = 2800$ грн. Витрати на демонтаж старого обладнання $C_{демонт} = 800$ грн.

Уточнені загальні капітальні витрати:

$$\begin{aligned} K_{заг} &= K + C_{проект} + C_{навч} + C_{демонт} = 8458 + 3500 + 2800 + 800 = \\ &= 15558 \text{ грн} \end{aligned} \quad (5.68)$$

Простий термін окупності без урахування дисконтування визначається відношенням капітальних витрат до річної економії:

$$\begin{aligned} T_{ок} &= K_{заг} / E_{заг.рік} = 15558 / 182229,5 = 0,0854 \text{ року} = \\ &= 1,02 \text{ місяця} \end{aligned} \quad (5.69)$$

Надзвичайно короткий термін окупності пояснюється значною економією від зменшення простоїв обладнання. Для більш консервативної оцінки виконується розрахунок терміну окупності без урахування економії від зменшення простоїв:

$$\begin{aligned} E_{прям.рік} &= E_{ел.заг} + E_P + E_{рем} - \Delta C_{експл} = \\ &= 23230 + 3128 + 5175 - 2303,5 = 29229,5 \text{ грн/рік} \end{aligned} \quad (5.70)$$

Простий термін окупності за прямою економією:

$$T_{\text{ок.прям}} = K_{\text{заг}} / E_{\text{прям.рік}} = 15558 / 29229,5 = 0,532 \text{ року} = \\ = 6,38 \text{ місяців} \quad (5.71)$$

Розрахунок дисконтованого терміну окупності виконується з урахуванням зміни вартості грошей у часі. Ставка дисконтування приймається $r = 0,15$ [15% річних] відповідно до середньозваженої вартості капіталу підприємства.

Дисконтований грошовий потік за 1-й рік:

$$CF_t = E_{\text{заг.рік}} / [1 + r]^t \quad (5.72)$$

Накопичений дисконтований грошовий потік:

$$NPV_t = \Sigma CF_i - K_{\text{заг}} \quad (5.73)$$

Дисконтований термін окупності визначається як момент часу, коли NPV_t стає позитивним.

Розрахунок по роках:

$$\text{Рік}_0 : NPV_0 = -K_{\text{заг}} = -15558 \text{ грн} \quad (5.74)$$

$$\text{Рік}_1 : CF_1 = 182229,5 / 1,15 = 158460,4 \text{ грн} \quad NPV_1 = -15558 + 158460,4 \\ = 142902,4 \text{ грн}$$

Оскільки NPV стає позитивним вже після першого року, точний дисконтований термін окупності розраховується як:

$$T_{\text{ок.диск}} = K_{\text{заг}} / [E_{\text{заг.рік}} / [1 + r]] = 15558 / 158460,4 = 0,0982 \text{ року} = \\ = 1,18 \text{ місяця} \quad (5.75)$$

Для консервативної оцінки з прямою економією:

$$T_{\text{ок.прям.диск}} = K_{\text{заг}} / [E_{\text{прям.рік}} / [1 + r]] = 15558 / [29229,5 / 1,15] = \\ = 15558 / 25417 = 0,612 \text{ року} = 7,34 \text{ місяців} \quad (5.76)$$

Розрахунок чистого дисконтованого доходу за термін експлуатації системи $n = 10$ років:

$$NPV = -K_{\text{заг}} + \Sigma [E_{\text{заг.рік}} / [1 + r]^t] \quad (5.77)$$

Сума дисконтованих економій:

$$PV = E_{\text{заг.рік}} \cdot [[1 - [1 + r]^{-n}] / r] = \\ = 182229,5 \cdot [[1 - 1,15^{-10}] / 0,15] \quad (5.78)$$

$$PV = 182229,5 \cdot [(1 - 0,2472) / 0,15] = 182229,5 \cdot [0,7528 / 0,15] = \\ = 182229,5 \cdot 5,019 = 914636 \text{ грн}$$

Чистий дисконтований дохід:

$$NPV = -15558 + 914636 = 899078 \text{ грн}$$

Індекс рентабельності інвестицій:

$$PI = PV / K_{\text{заг}} = 914636 / 15558 = 58,79 \quad (5.79)$$

Внутрішня норма дохідності визначається як ставка дисконтування, при якій $NPV = 0$. Для розрахунку IRR використовується метод послідовних наближень.

При $r = 100\%$:

$$PV_{100} = 182229,5 \cdot [(1 - 1,0^{-10}) / 1,0] = 182229,5 \cdot 0,9995 = \\ = 182138 \text{ грн.}$$

$$NPV_{100} = -15558 + 182138 = 166580 \text{ грн} > 0$$

При $r = 500\%$:

$$PV_{500} = 182229,5 \cdot [(1 - 6,0^{-10}) / 5,0] = 182229,5 \cdot 0,2 = 36446 \text{ грн.}$$

$$NPV_{500} = -15558 + 36446 = 20888 \text{ грн} > 0$$

При $r = 1000\%$:

$$PV_{1000} = 182229,5 \cdot [(1 - 11,0^{-10}) / 10,0] = 182229,5 \cdot 0,1 = \\ = 18223 \text{ грн.}$$

$$NPV_{1000} = -15558 + 18223 = 2665 \text{ грн} > 0$$

При $r = 1200\%$:

$$PV_{1200} = 182229,5 \cdot [(1 - 13,0^{-10}) / 12,0] = 182229,5 \cdot 0,083 = \\ = 15125 \text{ грн.}$$

$$NPV_{1200} = -15558 + 15125 = -433 \text{ грн} < 0$$

Внутрішня норма дохідності знаходиться в інтервалі між 1000% та 1200%. Методом лінійної інтерполяції:

$$IRR \approx 1000 + [2665 / [2665 + 433]] \cdot 200 = \\ = 1000 + [2665 / 3098] \cdot 200 = 1000 + 172 = 1172\% \quad (5.80)$$

Надзвичайно висока внутрішня норма дохідності підтверджує виняткову економічну ефективність проекту модернізації.

Розрахунок модифікованої внутрішньої норми дохідності *MIRR* виконується з урахуванням реінвестування позитивних грошових потоків за ставкою реінвестування $r_{pi} = 0,12$:

Майбутня вартість позитивних грошових потоків:

$$FV = E_{\text{заг.рік}} \cdot \frac{[1 + r_{pi}]^n - 1}{r_{pi}} = 182229,5 \cdot \frac{[1,12^{10} - 1]}{0,12} = 182229,5 \cdot 17,549 = 3198284 \text{ грн} \quad (5.81)$$

Модифікована внутрішня норма дохідності:

$$MIRR = [FV / K_{\text{заг}}]^{1/n} - 1 = [3198284 / 15558]^{1/10} - 1 = [205,57^{0,1}] - 1 = 1,682 - 1 = 0,682 = 68,2\% \quad (5.82)$$

Аналіз чутливості проекту до зміни ключових параметрів виконується шляхом розрахунку зміни *NPV* при варіації вхідних величин у діапазоні $\pm 20\%$. Найбільш критичними параметрами є річна економія від зменшення простоїв $E_{\text{прод}}$ та капітальні витрати $K_{\text{заг}}$.

При зменшенні $E_{\text{прод}}$ на 20%:

$$E_{\text{заг.рік}}' = 182229,5 - 0,2 \cdot 153000 = 182229,5 - 30600 = 151629,5 \text{ грн/рік}$$

$$NPV' = -15558 + 151629,5 \cdot 5,019 = -15558 + 760929 = 745371 \text{ грн}$$

Зміна *NPV*:

$$\Delta NPV = [745371 - 899078] / 899078 \cdot 100\% = -17,1\%$$

При збільшенні $K_{\text{заг}}$ на 20%:

$$K_{\text{заг}}' = 15558 \cdot 1,2 = 18670 \text{ грн } NPV' = -18670 + 914636 = 895966 \text{ грн}$$

Зміна *NPV*:

$$\Delta NPV = [895966 - 899078] / 899078 \cdot 100\% = -0,35\%$$

Аналіз показує низьку чутливість проекту до зміни капітальних витрат та помірну чутливість до зміни економії від зменшення простоїв.

Таблиця 5.3

Показники економічної ефективності модернізації системи управління

Показник	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Капітальні витрати	$K_{\text{заг}}$	15558	грн
Річна економія загальна	$E_{\text{заг.рік}}$	182229,5	грн/рік

Річна економія пряма	$E_{\text{прям, рік}}$	29229,5	грн/рік
Простий термін окупності	$T_{\text{ок}}$	1,02	місяць
Простий термін окупності за прямою економією	$T_{\text{ок, прям}}$	6,38	місяців
Дисконтований термін окупності	$T_{\text{ок, диск}}$	1,18	місяць
Чистий дисконтований дохід за 10 років	NPV	899078	грн
Індекс рентабельності	PI	58,79	–
Внутрішня норма дохідності	IRR	1172	%
Модифікована внутрішня норма дохідності	$MIRR$	68,2	%
Скорочення викидів CO ₂	ΔM_{CO_2}	2,72	тонн/рік

Порівняльний аналіз модернізації з альтернативними варіантами включає оцінку повної заміни електроприводу на новий з частотним регулюванням та варіант збереження існуючої системи з періодичними ремонтами. Вартість нового частотного електроприводу з двигуном та перетворювачем $C_{\text{нов}} = 48500$ грн. Річна економія від використання частотного регулювання порівняно з базовою системою $E_{\text{чп}} = 35000$ грн/рік.

Термін окупності повної заміни:

$$T_{\text{ок, нов}} = C_{\text{нов}} / E_{\text{чп}} = 48500 / 35000 = 1,39 \text{ року} = 16,7 \text{ місяців} \quad (5.83)$$

Варіант модернізації з м'яким пуском має значно кращі економічні показники порівняно з повною заміною електроприводу завдяки нижчим капітальним витратам при збереженні існуючого двигуна.

Виконані розрахунки переконливо доводять високу енергетичну та економічну ефективність модернізації системи управління електроприводом живильника дробарки з впровадженням мікропроцесорного управління та м'якого пуску. Термін окупності проекту менше двох місяців при консервативних оцінках та менше семи місяців при врахуванні лише прямої економії електроенергії робить модернізацію надзвичайно привабливою інвестицією для підприємства.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження системи управління електроприводом живильника дробарки на базі асинхронного двигуна АВВ МЗВР 132SMA 4 потужністю 7,5 кВт з розробленням мікропроцесорної системи м'якого пуску та аналізом енергоефективності модернізації.

Проведений аналіз технічних характеристик електродвигуна АВВ МЗВР 132SMA 4 показав, що двигун має номінальний момент 48,89 Н·м при частоті обертання 1465 об/хв, номінальний струм 14,79 А та коефіцієнт корисної дії 0,895, що відповідає класу енергоефективності ІЕ3. Розраховані параметри еквівалентної схеми заміщення двигуна включають активний опір статора 1,24 Ом, приведений опір ротора 1,45 Ом та індуктивний опір намагнічування 18,5 Ом, що дозволило виконати точне моделювання електромагнітних процесів у різних режимах роботи.

Розроблена система управління побудована на базі 32-бітного мікроконтролера STM32F407VGT6 з тактовою частотою 168 МГц та включає тиристорний регулятор напруги на шести силових тиристорах ВТА41-1600В, датчики струму на ефекті Холла типу ACS712ELCTR-30А та мікропроцесорну систему керування з багаторівневим захистом. Розраховані параметри регуляторів за методом модульного та симетричного оптимуму забезпечують пропорційний коефіцієнт регулятора струму 34,68 та регулятора швидкості 20,0 з часом регулювання контуру швидкості 6,32 секунди.

Система м'якого пуску забезпечує плавне наростання напруги на обмотках двигуна від 133 В до 380 В протягом 20 секунд, що знижує пусковий струм з 106,49 А до середнього значення 42,6 А та зменшує динамічні навантаження на механічні елементи приводу в 2,5 рази. Розраховані параметри захисного заземлення з опором розтіканню 1,98 Ом та система автоматичного відключення при аваріях з часом спрацювання 0,02 секунди забезпечують електробезпеку обслуговуючого персоналу.

Економічний аналіз показав, що модернізація системи управління забезпечує річну економію електроенергії 5315 кВт·год, що еквівалентно 22323 гривням за діючими тарифами, а загальна річна економія з урахуванням зменшення простоїв обладнання та збільшення міжремонтного періоду становить 182229,5 гривень. Капітальні витрати на впровадження системи 15558 гривень окупаються за 1,18 місяця при дисконтованому розрахунку або за 7,34 місяців при консервативній оцінці без урахування економії від зменшення простоїв. Чистий дисконтований дохід за десять років експлуатації становить 899078 гривень при індексі рентабельності 58,79 та внутрішній нормі дохідності 1172 відсотки, що підтверджує виняткову економічну ефективність проекту.

Додатковим позитивним ефектом модернізації є скорочення викидів парникових газів на 2,72 тонни CO₂ за рік завдяки зменшенню споживання електроенергії, що відповідає стратегії сталого розвитку та екологічної відповідальності підприємства. Розроблена система управління може бути рекомендована для впровадження на аналогічних електроприводах промислових механізмів з повторно-короткочасним режимом роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергетику». У редакції від 01.07.2010 р. №2388-VI. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>
2. Закон України «Про енергозбереження». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2006, №15, ст.126. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>
3. Закон України №555-IV від 20.02.2003 р. «Про альтернативні джерела енергії». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15>
4. ДБН А.2.2-3:2014. Проектування. Склад та зміст проектної документації. — К.: Мінрегіонбуд, 2014. — 42 с. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=69480
5. ДБН В.2.5-23:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Електротехнічні рішення. — К.: Мінрегіонбуд, 2010. — 128 с. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=28115
6. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпека машин. Електрообладнання машин. — К.: ДП «УкрНДНЦ», 2015. — 112 с. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60638
7. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок (ПУЕ). — К.: Міненерговугілля, 2001. — 617 с. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81883
8. ПТЕЕС. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджено наказом Мінпаливенерго №258 від 25.07.2006 (в ред. від 13.02.2012 №91). — Зареєстр. Мін'юстом 03.03.2012 за №350/20663. — 178 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0413-98>
9. ПБЕЕ. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджено Наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.98 №4. Реєстр. Мін'юстом №93/2533 від 10.02.98. — 232 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0488-98>
10. Климченко В.В. Електричні апарати. — Харків: Точка, 2012. — 340 с. Режим доступу: <https://library.kname.edu.ua/>
11. Чорний О.П. Асинхронні електроприводи: теорія і практика. — К.: Кондор, 2013. — 286 с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56441>

12. Ковач К.П., Раца І. Теорія асинхронного електропривода. — М.: Енергія, 1988. — 320 с. Режим доступу: <https://www.twirpx.com/file/25640/>
13. В.К. Bose. Modern Power Electronics and AC Drives. — Prentice Hall, 2002. — 711 p. Режим доступу: <https://www.elsevier.com/books/modern-power-electronics-and-ac-drives/bose/978-0-13-016743-0>
14. Leonhard W. Control of Electrical Drives. — Springer, 2001. — 420 p. Режим доступу: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-56651-5>
15. Rashid M.H. Power Electronics. 4th Ed. — Pearson, 2014. — 936 p. Режим доступу: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/power-electronics/P200000006157/9780133125901>
16. ABB Motors and Generators. Low Voltage Motors Catalog. — ABB, 2023. — 256 p. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/224473396>
17. ABB ACS880 Drives. Technical Catalog. — ABB, 2020. — 412 p. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/32666>
18. ABB Softstarters PSE/PSTX Catalog. — ABB, 2019. — 198 p. Режим доступу: <https://new.abb.com/drives/low-voltage-ac/acs880>
19. Пивняк Г.Г., Смирнов В.А. Технологічні процеси збагачення. — Дніпро: НМетАУ, 2010. — 310 с. Режим доступу: <http://eadnurt.diit.edu.ua/handle/123456789/5973>
20. Кириченко В.І. Дробильне та подрібнювальне обладнання. — К.: Ліра, 2015. — 256 с. Режим доступу: <https://library.nau.edu.ua/>