

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження експлуатаційних характеристик та якісних показників різних типів електродвигунів з аналізом сфер їх застосування»

Виконав

(підпис)

Микола ШЕЛЕСТ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЗЕТЕ 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

Олена ДОВЖИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу

Микола ШЕЛЕСТ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження експлуатаційних характеристик та якісних показників різних типів електродвигунів з аналізом сфер їх застосування.
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Чепіжний Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент.
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: паспортні дані електродвигунів, правила улаштування електроустановок, правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1. Аналіз основних типів електродвигунів та їх характеристика. 2. Аналітичне та експериментальне обґрунтування енергетичної ефективності електроприводів з різними електродвигунами. 3. Порівняльний аналіз різних типів електродвигунів відповідно до результатів розрахунку. 4. Охорона праці. 5. Економічне обґрунтування впровадження PMSM-двигунів. Висновки та пропозиції. Список використаної літератури. Додатки.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Микола ШЕЛЕСТ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Збір інформації про особливості електродвигунів різних типів	до 02.08.2025 р.	
2	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 1. Аналіз основних типів електродвигунів та їх характеристика»	до 30.08.2025р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 2. Аналітичне та експериментальне обґрунтування енергетичної ефективності електроприводів з різними електродвигунами»	до 19.09.2025 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 3. Порівняльний аналіз різних типів електродвигунів відповідно до результатів розрахунку»	до 03.10.2025 р.	
8	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
9	Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування впровадження PMSM-двигунів»	до 20.10.2025 р.	
10	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
11	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
12	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
13	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Микола ШЕЛЕСТ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Шелест Микола Сергійович «Дослідження експлуатаційних характеристик та якісних показників різних типів електродвигунів з аналізом сфер їх застосування».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025

У магістерській роботі проведено всебічне дослідження технічних, енергетичних та експлуатаційних характеристик асинхронного електродвигуна серії AIP90L2 та синхронного двигуна з постійними магнітами потужністю 3 кВт (PMSM, IEC Frame 90). Основною метою дослідження було визначення доцільності заміни традиційних асинхронних двигунів у промислових електроприводах більш сучасними синхронними двигунами з постійними магнітами на основі порівняння показників їх ефективності, надійності та економічності протягом експлуатації.

У роботі виконано детальний порівняльний аналіз технічних параметрів обраних двигунів, включаючи коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, пускові струми, споживану активну та реактивну потужність, рівень шуму та тепловиділення. На основі застосування розрахунково-графічних методів було побудовано залежності базових характеристик двигунів, що дозволило зробити висновок щодо енергетичних переваг синхронного двигуна з постійними магнітами над асинхронним аналогом.

У рамках економічного аналізу обґрунтовано доцільність впровадження PMSM у складі промислових та сільхоз приводів завдяки значному скороченню витрат на електроенергію, зменшенню втрат у системі живлення, тривалішому міжсервісному періоду та нижчим експлуатаційним витратам. Визначено термін

окупності модернізації електроприводу та наведено приклади практичного розрахунку економії.

Додатково у роботі запропоновано комплекс заходів з охорони праці, спрямованих на підвищення безпеки обслуговування електроприводів, що включає рекомендації щодо електробезпеки, запобігання ураженню електричним струмом, організації безпечного робочого середовища та попередження професійних ризиків під час монтажу та експлуатації електродвигунів.

Отримані результати не лише підтверджують технічні й економічні переваги використання двигунів PMSM у сучасних електроприводах, але й можуть бути корисними для фахівців у галузі автоматизації та енергоменеджменту при модернізації промислових і сільхоз систем та впровадженні інноваційних технологій в умовах зростання вимог до енергоефективності.

Ключові слова: електродвигун, асинхронний двигун, синхронний двигун з постійними магнітами, енергоефективність, промисловий електропривід, PMSM, AIP90L2, частотне регулювання.

ABSTRACT

Shelest Mykola Serhiiovych «Study of operational characteristics and quality indicators of different types of electric motors with analysis of their application areas».

Qualification work for obtaining a master's degree in electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics under the educational program «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics» in specialty 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics». Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The master's thesis presents a comprehensive study of the technical, energy-related, and operational characteristics of the asynchronous electric motor of the AIR90L2 series and the 3 kW permanent magnet synchronous motor (PMSM, IEC Frame 90). The main goal of the study was to assess the feasibility of replacing traditional asynchronous motors in industrial electric drives with more modern permanent magnet synchronous motors based on a comparison of their efficiency, reliability, and cost-effectiveness during operation.

The thesis includes a detailed comparative analysis of the technical parameters of the selected motors, including efficiency factor, power factor, starting currents, active and reactive power consumption, noise levels, and heat dissipation. Using computational and graphical methods, dependencies of the motors' basic characteristics were constructed, allowing for conclusions regarding the energy advantages of the permanent magnet synchronous motor over the asynchronous counterpart.

As part of the economic analysis, the practical feasibility of implementing PMSMs in industrial drives is justified due to significant reductions in energy consumption, decreased power system losses, extended maintenance intervals, and lower operational costs. The payback period of electric drive modernization was determined, and examples of practical savings calculations were provided.

Additionally, the thesis proposes a set of occupational safety measures aimed at improving electric drive maintenance safety, including recommendations for electrical

safety, prevention of electric shock, organization of a safe working environment, and mitigation of occupational risks during the installation and operation of electric motors.

The obtained results not only confirm the technical and economic advantages of using PMSMs in modern electric drives but also offer valuable insights for specialists in automation and energy management when modernizing industrial systems and implementing innovative technologies under increasing energy efficiency requirements.

Keywords: electric motor, asynchronous motor, permanent magnet synchronous motor, energy efficiency, industrial electric drive, PMSM, AIR90L2, frequency control.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКА.....	13
1.1 Особливості класифікації електродвигунів та сфери їх застосування.....	14
1.2 Особливості використання електродвигунів відповідно до ККД.....	22
1.3 Особливості будови та загальної компоновки синхронних електродвигунів із постійними магнітами.....	24
Висновки до розділу.....	28
2 АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З РІЗНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ.....	29
2.1 Методика аналізу ефективності електродвигунів.....	29
2.2 Результати проведеного аналізу ефективності електродвигунів.....	32
Висновки до розділу.....	33
3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РІЗНИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІДПОВІДНО ДО РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ.....	34
Висновки до розділу.....	40
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	41
4.1 Загальні положення.....	41
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	41
4.3 Вимоги до персоналу та організації робіт.....	41
4.4 Електробезпека та пожежна безпека.....	42
4.5 Безпечне проведення експериментальних досліджень PMSM та асинхронних двигунів.....	42
Висновки до розділу.....	43
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ PMSM- ДВИГУНІВ.....	44

5.1 Економічний розрахунок.....	44
5.2 Періодичність технічного обслуговування та експлуатаційні ефекти.....	46
Висновки до розділу.....	47
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	50
ДОДАТКИ.....	54

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку промисловості питання енергозбереження та підвищення ефективності електромеханічних систем набуває особливої значущості. Електродвигуни є основними джерелами механічної енергії в більшості технологічних процесів – від насосних і компресорних установок до високоточного виробничого обладнання.

В умовах зростання цін на енергоносії та необхідності зменшення викидів парникових газів особливої уваги потребує вибір типу електродвигуна, який би забезпечував оптимальне співвідношення між енергоспоживанням, надійністю та довговічністю.

Порівняльний аналіз сучасних електродвигунів дає змогу визначити найбільш ефективні технічні рішення для промислових систем та сільхоз приводів.

Аналіз стану наукової розробки проблеми. Дослідження характеристик різних електродвигунів дозволяє виконувати підвищення їх конструктивних особливостей, що є науковою проблемою вітчизняних та зарубіжних дослідників. При цьому дослідження ефективності використання сучасних та більш ефективних двигунів в різних галузях є доволі актуальною проблемою та потребує дослідження.

Мета та задачі досліджень. Метою роботи є аналіз і порівняння технічних характеристик електродвигунів для визначення їх енергоефективності, експлуатаційних показників і доцільності використання в промислових і сільськогосподарських умовах.

Для вирішення поставленої мети пропонується вирішити наступні задачі:

1. Для порівняння обрати асинхронний двигун серії AIP (модель AIP90L2, потужністю 3 кВт) та синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM 3 kW, IEC Frame 90).

2. Провести аналіз та порівняти результати показників енергоефективності, експлуатаційних показників.

3. Проаналізувати особливості математичного моделювання процесів в електродвигунах та запропонувати математичну модель для проведення аналізу.

4. Виконати економічний розрахунок особливостей використання двох електродвигунів.

5. Навести основні заходи з охорони праці при проведенні випробувань електродвигунів.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є електродвигуни (асинхронний двигун AIP90L2 та синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM 3 kW, IEC Frame 90), що використовуються в електроприводі промислового та сільськогосподарського обладнання.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є технічні, енергетичні та експлуатаційні характеристики асинхронного двигуна серії AIP90L2 та синхронного двигуна з постійними магнітами PMSM 3 kW (Frame 90).

Завдання дослідження. Основним завданням дослідження є проведення порівняльного аналізу різних електродвигунів з можливістю їх використання в галузі АПВ.

Методи дослідження. У роботі використано аналітичні та розрахунково-графічні методи порівняння характеристик електродвигунів; побудову залежностей основних параметрів (моменту, струму, ККД, $\cos\phi$) від навантаження; аналіз енергоспоживання на основі типових даних технічних каталогів та експериментально-розрахункових моделей. Для оцінки ефективності застосовано енергетичні показники та економічні критерії вибору двигуна.

Наукова новизна роботи. У роботі виконано порівняльний аналіз технічних, енергетичних та експлуатаційних характеристик асинхронного двигуна серії AIP90L2 та синхронного двигуна з постійними магнітами PMSM 3 kW (Frame 90). Проведено узагальнений аналіз енергоефективності цих двигунів на основі побудови графічних залежностей основних параметрів, таких як момент, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності та струм споживання залежно від навантаження.

Крім того, обґрунтовано доцільність застосування синхронного двигуна з постійними магнітами у промислових та сільськогосподарських умовах, особливо за тривалого або змінного навантаження, з огляду на його вищу енергоефективність, менші втрати холостого ходу, підвищену довговічність та нижчі експлуатаційні витрати порівняно з традиційним асинхронним двигуном. Отримані результати сприяють розвитку методик вибору енергозберігаючих електроприводів та можуть бути використані для модернізації сучасних автоматизованих систем керування у промисловості.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати мають практичне значення для вибору оптимального типу електродвигуна при проєктуванні або модернізації електроприводів у промислових та сільськогосподарських системах. Проведений порівняльний аналіз підтверджує, що синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM) характеризується вищим ККД, меншими втратами енергії та довшим терміном служби порівняно з асинхронним двигуном серії AIP. Це дозволяє рекомендувати PMSM як більш економічно доцільний і енергозберігаючий варіант для сучасних електромеханічних систем.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота містить 5 розділів, 2 додатки, 3 таблиці, 15 рисунків, 31 джерело.

1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Проблема підвищення енергоефективності електроприводів у сільському господарстві набуває особливої актуальності в умовах постійного зростання вартості енергоресурсів та необхідності зменшення енергоспоживання технологічних процесів. Сільськогосподарські підприємства використовують широкий спектр електромеханічного обладнання. До нього відносяться насоси, вентилятори, компресори, транспортери, зерносушарки та інші установки, які працюють під значними навантаженнями і в умовах підвищеної запиленості чи вологості. Висока інтенсивність експлуатації таких агрегатів обумовлює значну частку енерговитрат у загальному балансі підприємства, тому шляхи їх модернізації є пріоритетними напрямками підвищення ефективності виробництва.

На сьогодні особливої ваги набуває перехід до більш енергетично економних систем електроприводу, здатних забезпечити оптимальне співвідношення між споживаною енергією та корисною механічною потужністю. Одним із головних шляхів реалізації цього завдання є застосування електродвигунів із підвищеним коефіцієнтом корисної дії (ККД), зменшеними втратами на нагрівання, покращеними характеристиками моменту та підвищеною довговічністю. Використання таких двигунів дозволяє не лише знизити експлуатаційні витрати, а й забезпечити стабільність роботи технологічних процесів упродовж тривалого періоду.

З метою визначення найефективніших напрямів модернізації систем електроприводу доцільно розглянути та проаналізувати існуючі типи електродвигунів, що застосовуються у сільському господарстві. Порівняльний аналіз їхніх конструктивних, енергетичних і експлуатаційних характеристик дасть змогу обґрунтувати вибір оптимальної моделі електродвигуна, яка забезпечить досягнення високих показників енергоефективності, надійності та довговічності при мінімальних витратах ресурсів.

1.1 Особливості класифікації електродвигунів та сфери їх застосування

Класифікація електродвигунів за струмом живлення та принципом дії. Однією з базових ознак класифікації електричних двигунів є тип струму, що використовується для їх живлення. За цією ознакою електричні машини поділяються на двигуни постійного струму (DC), змінного струму (AC) та універсальні двигуни.



Рисунок 1.1 – Класифікація електродвигунів за типом струму

Електродвигуни постійного струму (DC). Ці машини перетворюють енергію постійного струму на механічну, використовуючи взаємодію магнітного поля статора та струму в обмотках ротора. Залежно від наявності вузла комутації, вони поділяються на щіткові та безщіткові.

Щіткові двигуни постійного струму (DC). Принцип роботи ґрунтується на механічній комутації струму в обмотках ротора за допомогою колектора та щіток. Цей механізм забезпечує зміну напрямку струму в обмотках ротора, підтримуючи обертальний момент у постійному напрямку.

Переваги: Високий пусковий момент та просте регулювання швидкості обертання шляхом зміни напруги живлення або струму збудження.

Недоліки: Знос щітково-колекторного вузла, що спричиняє іскріння та потребу в регулярному технічному обслуговуванні (заміна щіток та очищення колектора).

Особливості застосування: Широко застосовуються у випадках, коли необхідно отримати великий пусковий момент, плавне регулювання швидкості та простоту керування.

Завдяки можливості змінювати швидкість обертання безпосередньо шляхом регулювання напруги живлення або струму збудження, такі двигуни є зручними для систем, де потрібна точна швидкісна або моментна характеристика.

Безщіткові двигуни постійного струму (BLDC). Конструктивно ці двигуни є синхронними машинами, але функціонально працюють як машини постійного струму. Вони не мають механічного колектора, а комутація струму в обмотках статора здійснюється електронним контролером на основі даних від датчиків положення ротора.

Переваги: Висока ефективність, підвищена надійність, тривалий термін служби, а також компактність і низький рівень шуму.

Недоліки: Вища початкова вартість через використання постійних магнітів і необхідність складного електронного контролера для комутації обмоток.

Особливості застосування: Застосовуються у випадках, коли потрібні висока ефективність, точне керування швидкістю або моментом, низький рівень шуму та мінімальне технічне обслуговування.

Завдяки відсутності щітково-колекторного вузла і використанню електронної комутації, такі двигуни забезпечують стабільну роботу, тривалий ресурс і високу енергоефективність, особливо при тривалій експлуатації.

Електродвигуни змінного струму (АС). Ці машини використовують енергію змінного струму. Обертальний момент створюється завдяки взаємодії струмів ротора з обертовим магнітним полем, яке створюється обмотками статора. Вони поділяються на асинхронні та синхронні.

Асинхронні двигуни. Принцип дії базується на ефекті електромагнітної індукції: обертове магнітне поле статора індукує струми в обмотках ротора,

створюючи крутний момент. Швидкість обертання ротора завжди менша за швидкість обертання поля статора (наявність прослизання).

Переваги: Проста та надійна конструкція, низька вартість і мінімальні вимоги до технічного обслуговування.

Недоліки: Менший ККД при роботі на неповному навантаженні та наявність прослизання.

Особливості застосування: Найпоширеніший тип електричних машин у промисловості та побуті завдяки простоті конструкції, високій надійності та економічності в експлуатації.

Їх використовують у приводах, де не потрібне точне регулювання швидкості, а головною вимогою є надійна робота при тривалих навантаженнях.

Синхронні двигуни. Ці двигуни працюють таким чином, що швидкість обертання ротора дорівнює швидкості обертання магнітного поля статора. Ротор приводиться в синхронізм з полем завдяки електромагнітному збудженню або використанню постійних магнітів.

Переваги: Висока стабільність швидкості незалежно від навантаження та можливість компенсації реактивної потужності.

Недоліки: Складність запуску (потрібні додаткові пускові пристрої) та необхідність джерела постійного струму для живлення обмотки збудження (у двигунах без постійних магнітів).

Особливості застосування: Застосовуються у приводах, де необхідно забезпечити постійну швидкість обертання, незалежно від коливань навантаження, а також у системах, що вимагають високої енергоефективності та покращення коефіцієнта потужності. Завдяки роботі без прослизання та можливості керування збудженням, вони часто використовуються не лише як двигуни, а й як компенсатори реактивної потужності в енергосистемах.

Щітковий (комутаторний) універсальний двигун (AC/DC) Працює завдяки взаємодії магнітного поля статора та струму в обмотках ротора.

Комутація струму здійснюється механічно за допомогою щітково-колекторного вузла, що забезпечує сталість напрямку обертального моменту. Може працювати як від постійного, так і від змінного струму.

Переваги: Високий пусковий момент, просте регулювання швидкості зміною напруги, можливість живлення як від АС, так і від DC.

Недоліки: Знос щіток і колектора, іскріння, підвищений шум і потреба в регулярному обслуговуванні, менший термін служби порівняно з безщітковими двигунами.

Особливості застосування: Використовуються у побутовій техніці (пилососи, міксери, дрилі, шліфувальні машини), де потрібні високі оберти, компактність і регулювання швидкості.

Класифікація електродвигунів за конструкцією ротора. Конструкція ротора визначає спосіб індукції струмів та формування магнітного поля в рухомій частині двигуна, що істотно впливає на його експлуатаційні характеристики.

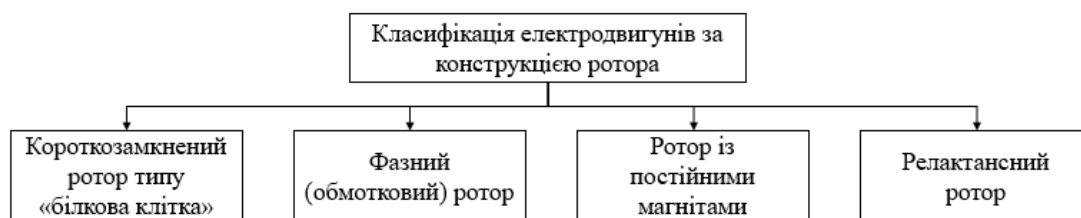


Рисунок 1.2 – Класифікація електродвигунів за конструкцією ротора

Короткозамкнений ротор (типу «білкова клітка»). Обмотка ротора виконана у вигляді стрижнів (провідників), замкнених по кінцях кільцями. Ця конструкція є типовою для більшості асинхронних двигунів.

Переваги: Простота конструкції, довговічність та мінімальне обслуговування.

Недоліки: Відносно низький пусковий момент і високий пусковий струм.

Особливості застосування: Найпоширеніші в електроприводах змінного струму завдяки простоті конструкції, високій надійності та мінімальним вимогам

до обслуговування. Відсутність обмотки ротора та контактних кілець забезпечує механічну міцність і стійкість до забруднення та вібрацій, що робить ці двигуни придатними для роботи у важких промислових та запилених сільхоз умовах.

Фазний (обмотковий) ротор. Ротор має повноцінну трифазну обмотку, виводи якої підключені до контактних кілець на валу двигуна. Це дозволяє вводити в електричне коло ротора додаткові пускові або регулювальні резистори.

Переваги: Можливість плавного регулювання моменту та підвищений пусковий момент.

Недоліки: Складніша та дорожча конструкція, а також потреба періодичного обслуговування щітково-контактного вузла.

Особливості застосування: Використовуються у приводах, де необхідний підвищений пусковий момент, плавне регулювання швидкості та контроль динамічних режимів роботи. Завдяки можливості підключення зовнішніх пускових або регулювальних резисторів у коло ротора, такі двигуни забезпечують зменшення пускового струму, покращення плавності запуску та контрольоване прискорення механізму.

Ротор із постійними магнітами. На поверхні або всередині тіла ротора закріплені постійні магніти, які створюють фіксований магнітний потік. Ця конструкція є основою синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM).

Переваги: Високий ККД, низькі втрати та стабільна робота при змінних навантаженнях.

Недоліки: Висока вартість магнітних матеріалів та складність керування електронними системами.

Особливості застосування: Застосовуються у системах, де необхідні висока енергоефективність, точне керування швидкістю та моментом, а також компактність і низький рівень шуму. Завдяки відсутності обмотки збудження на роторі та мінімальним втратам на нагрів, ці двигуни забезпечують високий

коефіцієнт корисної дії, високу щільність потужності та стабільну роботу при змінних навантаженнях.

Релактансний ротор. Це ротор без обмоток і магнітів, що складається лише із шарів феромагнітного матеріалу, розташованих таким чином, що магнітний опір (релюктанс) змінюється залежно від кута повороту.

Переваги: Висока механічна міцність, низька вартість, мінімальне технічне обслуговування.

Недоліки: Складні алгоритми керування та підвищені пульсації моменту.

Особливості застосування: Синхронні двигуни з релактансним ротором застосовуються у системах, де потрібні висока надійність, механічна міцність, низька вартість та мінімальне технічне обслуговування, поєднані з можливістю енергоефективного керування швидкістю. Завдяки відсутності обмоток і постійних магнітів ротор має високу термічну та механічну стійкість, що дозволяє використовувати двигуни цього типу у важких промислових, сільськогосподарських умовах і при високих обертах.

Класифікація електродвигунів за особливими умовами експлуатації.

У деяких галузях (хімія, нафтогаз, харчова промисловість) двигуни повинні мати спеціальне виконання для захисту від вибухів, пилу, вологи чи агресивних середовищ.

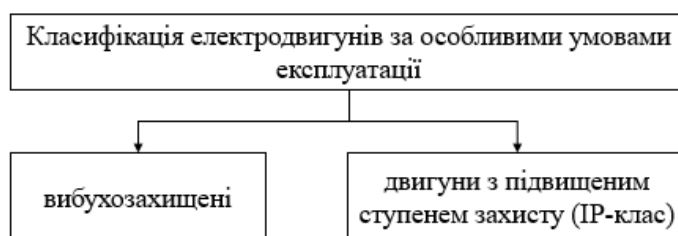


Рисунок 1.3 – Класифікація електродвигунів за особливостями експлуатації

Вибухозахищені двигуни. Конструкція цих двигунів, часто з посиленням корпусом, запобігає можливості займання навколишнього вибухонебезпечного середовища внаслідок іскріння, перегрівання чи руйнування корпусу.

Переваги: Високий рівень безпеки при роботі у вибухонебезпечних середовищах.

Недоліки: Висока вартість виготовлення та ускладнене технічне обслуговування через герметичну конструкцію.

Особливості застосування: Застосовують у вибухонебезпечних середовищах, де в повітрі можуть бути присутні горючі гази, пари або пилю, здатні утворювати вибухонебезпечні суміші. Їхня конструкція має посилений герметичний корпус, який запобігає поширенню вибуху всередині двигуна у зовнішнє середовище навіть у разі займання всередині корпусу. Також передбачено спеціальні системи ущільнення, ізоляції та охолодження, що мінімізують ризик іскріння та перегрівання.

Двигуни з підвищеним ступенем захисту (IP-клас). Такі машини мають підвищений рівень захисту (за стандартом IP – Ingress Protection) від проникнення твердих частинок (пилу) і рідин (вологи), що досягається використанням спеціальних ущільнювачів і покриттів.

Переваги: Стійкість до агресивних факторів зовнішнього середовища, вологості, пилу, вібрацій.

Недоліки: Вища собівартість та ускладнений теплообмін, що вимагає ретельнішого розрахунку системи охолодження.

Особливості застосування: Призначені для експлуатації в умовах, де можливий вплив пилу, вологи, агресивних середовищ або механічних забруднень. Конструкція таких двигунів передбачає використання герметизованих корпусів, спеціальних ущільнювачів валу, антикорозійних покриттів та ізоляційних матеріалів підвищеної стійкості, що забезпечує надійність роботи навіть у несприятливих кліматичних умовах.

Класифікація за кількістю фаз та швидкостей. Кількість фаз живлення визначає характер створюваного магнітного поля та сферу застосування двигуна.



Рисунок 1.4 – Класифікація електродвигунів за кількістю фаз та швидкостей

Однофазні двигуни. Ці двигуни працюють від стандартної однофазної мережі 220 В. Вони не можуть створити обертове магнітне поле самостійно, тому для запуску потребують допоміжних пристроїв (пускові обмотки, конденсатори).

Переваги: Простота та низька вартість, придатність для роботи від стандартної побутової мережі (220 В).

Недоліки: Низький ККД, обмежена потужність, необхідність додаткових пристроїв для запуску.

Особливості застосування: Застосовується в побутових, малопотужних промислових і сільськогосподарських установках.

Трифазні двигуни. Живляться від трифазної мережі (380...400 В). Три фази живлення, зміщені на 120° одна відносно одної, дозволяють самостійно створювати обертове магнітне поле рівномірної інтенсивності.

Переваги: Стабільна робота, висока потужність та економічність завдяки самостійному формуванню обертового поля.

Недоліки: Не призначені для підключення до стандартних побутових мереж (потрібна трифазна мережа).

Особливості застосування: Найпоширеніші типи промислових та сільськогосподарських електроприводів, оскільки живляться від трифазної мережі змінного струму (380–400 В).

Проаналізувавши різні типи електродвигунів, можна зробити висновок, що найбільш поширеними в сільському господарстві та промисловості є асинхронні двигуни змінного струму. Вони відзначаються простотою конструкції, надійністю, що робить їх оптимальними для більшості механізмів загального призначення.

Найбільш поширеною конструктивною серією серед асинхронних двигунів є серія АІР. Зокрема, двигуни типу АІР90L2 широко застосовуються у насосних установках, вентиляторах, компресорах, транспортерах, зернодробарках, мішалках та іншому технологічному обладнанні, що використовується як у промисловості, так і в сільському господарстві.

1.2 Особливості використання електродвигунів відповідно до ККД

Кожен електродвигун характеризується величиною ККД, що дозволяє використовувати його в певних технологічних процесах чи навіть сферах. Відповідно до цього виконаємо порівняльний аналіз основних електродвигунів за величиною ККД.

Нами розглянуто узагальнені значення ККД для основних типів електродвигунів, які застосовуються у сільському господарстві та промисловості. Порівняльна характеристика даних електродвигунів відповідно до значення ККД наведено на рисунку 1.5.

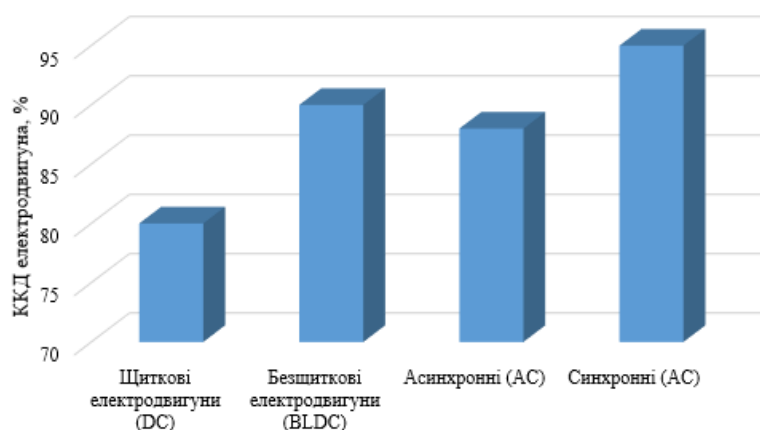


Рисунок 1.5 – Порівняння основних типів електродвигунів за ККД

Як видно з діаграми (рис. 1.5), найнижчими показниками ефективності характеризуються щіткові двигуни постійного струму, середній ККД яких становить близько 80%. Це пояснюється наявністю механічних втрат у колекторно-щітковому вузлі, а також втратами на нагрівання обмоток збудження. Незважаючи на простоту конструкції та низьку вартість, такі двигуни мають обмежену довговічність і потребують регулярного технічного обслуговування.

Безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) демонструють суттєво вищий рівень енергоефективності – близько 90%, що досягається за рахунок усунення механічних контактів і зменшення втрат на тертя. Вони характеризуються високою надійністю, стабільністю швидкісних характеристик і тривалим терміном служби, однак вимагають використання складних електронних систем керування, що впливає на їхню вартість.

Асинхронні двигуни змінного струму мають середній ККД на рівні 88%, що є результатом втрат на прослизання ротора та намагнічування. Такі двигуни залишаються найпоширенішими у с.-г. виробництві завдяки простоті конструкції, невисокій собівартості та надійності експлуатації, проте їх енергоефективність обмежена фізичною природою роботи.

Найвищі показники енергетичної ефективності демонструють синхронні двигуни змінного струму, середній ККД яких досягає 95%. Особливо ефективними є синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM), у яких відсутні втрати на струм збудження, що забезпечує стабільну роботу при високих навантаженнях і мінімальні втрати енергії. Високий рівень ККД таких двигунів сприяє зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню загальної енергоефективності технологічних процесів.

Таким чином, аналіз порівняльної діаграми свідчить, що перехід від традиційних асинхронних двигунів серії АІР до сучасних синхронних систем із постійними магнітами (PMSM) може стати перспективним напрямом підвищення енергоефективності електроприводів у сільському господарстві та промисловості. Попередні результати вказують, що двигуни PMSM мають

потенціал забезпечити вищий ККД, зменшені енергетичні втрати та підвищену експлуатаційну надійність у порівнянні з асинхронними аналогами.

Водночас асинхронні двигуни серії AIP продовжують залишатися найпоширенішими в експлуатації завдяки простоті конструкції, доступності, надійності. Це робить їх базовим еталоном для оцінки ефективності новітніх електромашин.

З огляду на це, у подальшому пропонується здійснити порівняльний аналіз асинхронних двигунів серії AIP90L2 та синхронних PMSM VOL-BL30B380 з метою визначення їхніх переваг, недоліків і доцільності застосування в умовах сільськогосподарського виробництва. Такий аналіз дасть змогу обґрунтувати вибір оптимального типу електропривода з точки зору енергоефективності, надійності та економічної доцільності.

1.3 Особливості будови та загальної компоновки синхронних електродвигунів із постійними магнітами

Синхронні електродвигуни з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) є сучасним розвитком традиційних синхронних машин, у яких електромагнітне збудження замінене магнітним полем від постійних магнітів. Це рішення дозволяє суттєво підвищити енергоефективність приводу та знизити експлуатаційні витрати, особливо в установках із тривалими циклами роботи.

Оскільки AIP90L2 застосовується у промислових і сільськогосподарських електроприводах середньої потужності, технічні характеристики двигунів які наведені в додатку А до дипломної роботи. Конструктивне виконання електродвигуна наведено на рисунку 1.6. також всі розміри електродвигуна AIP90L2 (рис. 1.6) наведено в додатку А дипломної роботи. То для проведення порівняльного аналізу обираємо схожий за потужністю та компоновкою синхронний електродвигун із постійними магнітами BLC Motor Frame 90L B3 який. відноситься до класу Standard Frame 90L (IEC)

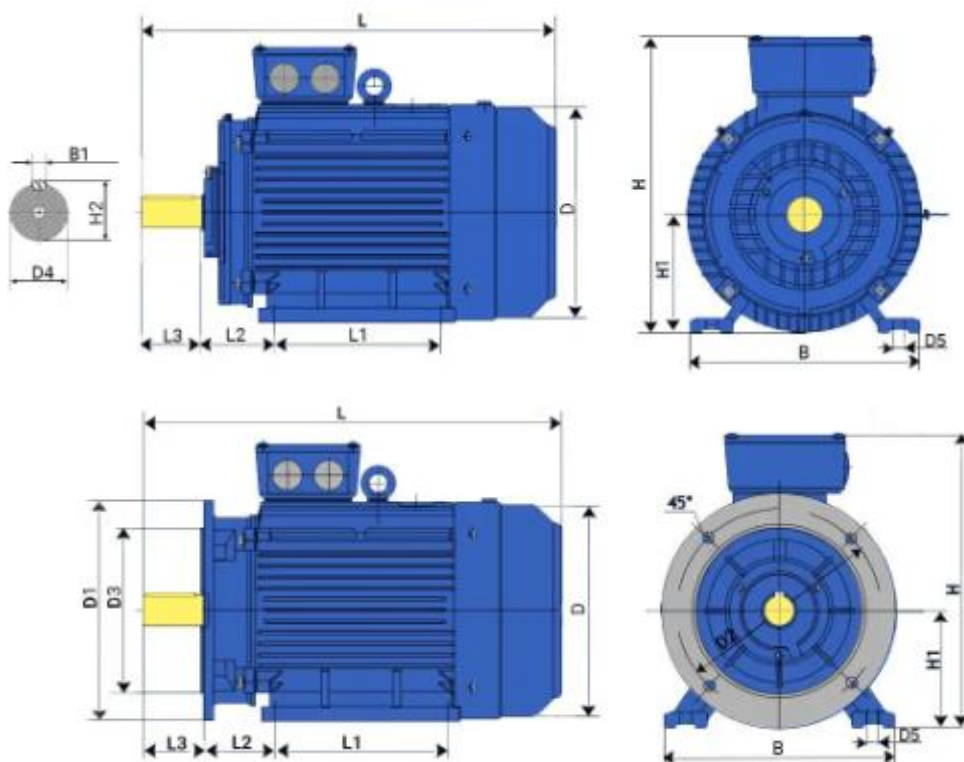


Рисунок 1.6 – Конструктивне виконання електродвигуна AIP90L2

Даний електродвигун також має потужність 3 кВт. Загальний вигляд даного електродвигуна наведено на рисунку 1.7.

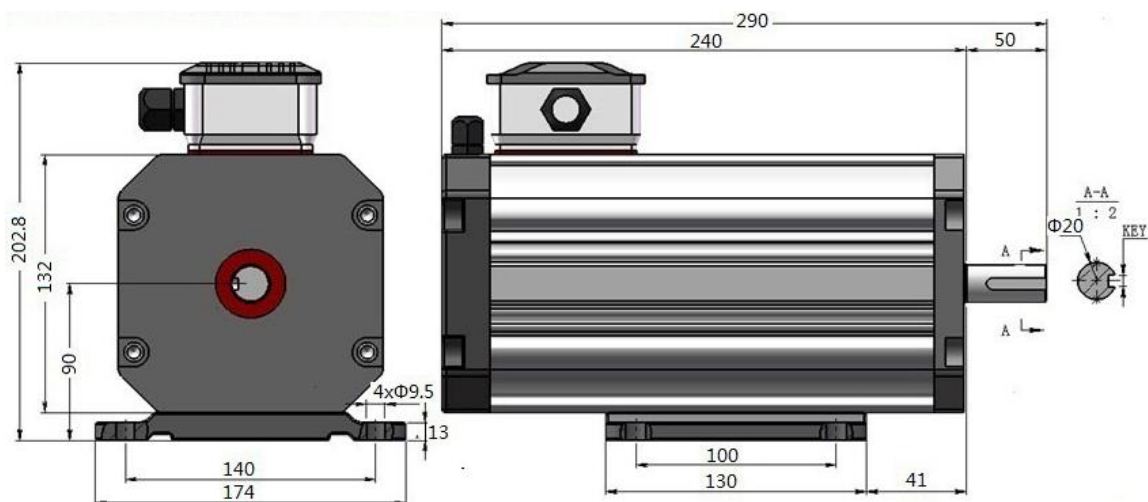


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд та конструктивне виконання електродвигуна BLC Motor Frame 90L B3

В додатку Б до дипломної роботи наведено основні характеристики двигунів типу BLC з потужністю 3 кВт.

Конструктивно синхронний двигун із постійними магнітами складається з статора та ротора.

Статор за своєю конструкцією подібний до статора асинхронного двигуна. Він включає сталевий корпус, осердя, набране з тонких листів електротехнічної сталі для зменшення вихрових втрат, та трифазну обмотку, розміщену в пазах осердя.

Обмотка формує обертове магнітне поле при живленні від частотного перетворювач (VFD) який зображений на рисунку 1.8 , і керується частотою та фазою напруги.



Рисунок 1.8 – Контролер драйвера безщіткового двигуна постійного струму AC80V-420V 10A 4000W

Ротор є основною конструктивною відмінністю від асинхронного двигуна. (рис. 1.9). Замість короткозамкненої «білячої клітки» у ньому встановлені постійні магніти (найчастіше з високоефективного сплаву NdFeB — неодим-залізо-бор), які створюють сталий магнітний потік.

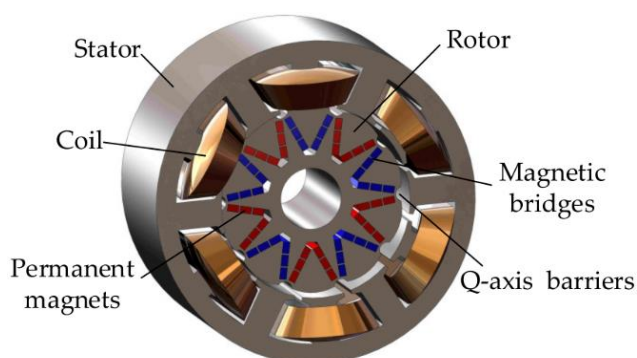


Рисунок 1.9 – Принципова будова PMSM двигуна

Магніти можуть розташовуватись на поверхні ротора або всередині його тіла (внутрішньомагнітна компоновка), що впливає на форму моментної характеристики та ступінь захисту магнітів від розмагнічування.

Принцип роботи PMSM оснований на подачі трифазної напруги на обмотку статора через частотний перетворювач (VFD) після чого створюється обертове магнітне поле. Це поле взаємодіє з постійним магнітним полем ротора, утвореним магнітами.

Унаслідок магнітного притягання та відштовхування, ротор «захоплюється» обертовим полем і починає обертатися синхронно з ним, тобто без ковзання (на відміну від асинхронних двигунів).

Оскільки магнітне поле ротора створюється без участі електричних струмів, у машині відсутні втрати на нагрів ротора, що зменшує загальні енергетичні втрати й підвищує коефіцієнт корисної дії (ККД). Крім того, момент, створюваний PMSM, залишається стабільним навіть за зміни навантаження, що забезпечує високу динамічність і точність регулювання.

Одним із ключових аспектів при модернізації електроприводів є механічна сумісність нового двигуна з існуючим обладнанням.

Обидва розглянуті двигуни – асинхронний AIP90L2 і синхронний VLC Motor Frame 90L B3 – мають однаковий типорозмір 90L згідно зі стандартом IEC 60072-1. Це означає, що вони ідентичні за основними монтажними параметрами:

- висота осі обертання (H) – 90 мм;
- відстань між кріпильними отворами (A, B) – відповідає виконанню B3 (лапове кріплення);
- діаметр і довжина виступаючого кінця вала (d, l) – стандартизовані для цього габариту.

Таким чином, перехід від асинхронного двигуна серії AIP до синхронного PMSM не потребує змін фундаментної плити, лап, муфт чи фланців. Механічна взаємозамінність дозволяє здійснювати енергоефективну модернізацію без капітальних витрат на переобладнання конструкції приводу.

Висновки до розділу

Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку електроприводів у с.-г. дозволяє сформулювати гіпотезу, що поступовий перехід від традиційних асинхронних двигунів до синхронних систем із постійними магнітами може стати закономірним етапом технічного вдосконалення електроприводів. Очікується, що такі двигуни здатні забезпечити підвищення ККД, покращення регульовальних характеристик і зменшення втрат електроенергії. Однак остаточне підтвердження цієї тенденції вимагає проведення детальних енергетичних розрахунків, оцінки показників надійності та визначення економічної доцільності впровадження таких систем у виробничих умовах.

2 АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З РІЗНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ

Метою даного розділу є аналітичний розрахунок показників ефективності роботи синхронних двигунів з постійними магнітами порівняно з асинхронними двигунами аналогічної потужності, зокрема визначення ККД, питомої енергоефективності, електромеханічного перетворення енергії та економічної доцільності використання PMSM у сільськогосподарських технологічних системах.

Для забезпечення об'єктивності порівняння, аналіз буде базуватися на характеристиках двох конкретних моделей з однаковою номінальною потужністю $P_{ном} = 3,0$ кВт у робочому режимі. Основні типи двигунів, що обрані для проведення аналізу є AIP 90L2 та PMSM VOL-BL30B380. Основні паспортні дані даних електродвигунів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Паспортні характеристики електродвигунів

Характеристика	Тип електродвигуна	
	AIP 90L2	PMSM VOL-BL30B380
Механічна потужність, $P_{мех}$	3,0	3,0
Номінальний крутний момент, $M_{ном}$	10,0	9,55
Номінальна швидкість, n	2860	3000
Коефіцієнт корисної дії, η	0,83	0,93
Номінальний струм, $I_{ном}$	6,5	4,9
Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$	0,85	1,0
Синхронна швидкість, n	3000	3000

2.1 Методика аналізу ефективності електродвигунів

На першому етапі проводиться вибір та фіксація рівнянь, що дозволяють перейти від паспортних даних до ключових енергетичних та механічних показників. Виходячи з цього розглянемо методику для аналізу основних показників роботи обраних для порівняння електродвигунів.

Механічна потужність, яку розвиває електродвигун на валу, визначається за формулою:

$$P_M = M \cdot \omega \quad (2.1)$$

де P_M – механічна потужність, Вт;

M – крутний момент, Н·м;

ω – кутова швидкість ротора, рад/с.

Величина кутової швидкості визначається за формулою:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.2)$$

де n – швидкість обертання, об/хв.

ККД характеризує ефективність перетворення електричної енергії в механічну та визначається з рівняння:

$$\eta = \frac{P_M}{P_{ВХ}} \quad (2.3)$$

де η – значення ККД електродвигуна;

$P_{ВХ}$ – активна вхідна потужність, Вт.

Повна потужність у трифазному колі визначається за виразом:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \quad (2.4)$$

де S – повна потужність, ВА;

U_L – лінійна напруга, В;

I_L – лінійний струм, А.

Активна складова розраховується:

$$P = S \cdot \cos\varphi \quad (2.5)$$

де φ – кут між напругою та струмом.

Реактивну розрахуємо наступним чином:

$$Q = S \cdot \sin\varphi \quad (2.6)$$

Сумарні втрати в електродвигуні можна виразити як:

$$P_{\text{втр}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{м}} \quad (2.7)$$

де $P_{\text{втр}}$ – сума всіх втрат, Вт.

Механічні втрати формуються внаслідок тертя в підшипниках, в'язкого опору та аеродинамічних втрат:

$$P_{\text{м}} = T_c \cdot \omega + (b + c_\omega)\omega^2 \quad (2.7)$$

де T_c – момент сухого тертя, Н·м;

b – в'язкий коефіцієнт тертя, Н·м·с/рад;

c_ω – коефіцієнт аеродинамічних втрат, Вт/(рад/с)².

Для асинхронних двигунів вводиться поняття коефіцієнта прослизання:

$$s = \frac{n_{\text{синхр}} - n}{n_{\text{синхр}}} \quad (2.8)$$

де s – прослизання, відн. од.;

$n_{\text{синхр}}$ – синхронна швидкість поля статора, об/хв;

n – фактична швидкість ротора, об/хв.

Потужність повітряного зазору:

$$P_{\text{ар}} = \frac{P_{\text{м}} + P_{\text{мех}}}{1 - s} \quad (2.9)$$

Втрати у міді ротора електродвигуна:

$$P_{cu,r} = s \cdot P_{ag} \quad (2.10)$$

Після обґрунтування послідовності дій та вибору необхідного математичного апарату, ми переходимо до кількісної оцінки енергетичних характеристик обраних двигунів.

2.2 Результати проведеного аналізу ефективності електродвигунів

Виведена вище методика дозволяє здійснити пряму підстановку паспортних та механічних даних для розрахунку ключових показників ефективності, які відобразимо в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Зведені розрахунки енергетичних показників електродвигунів

№ з/п	Показник	Тип електродвигуна	
		AIP 90L2	PMSM VOL-BL30B380
1	ККД η , %	82,6	93,0
2	Швидкість n , об/хв	2860	3000
3	Кутова швидкість ω , рад/с	299,50	314,16
4	Крутний момент M , Н·м	10,0	9,55
5	Механічна потужність P_m , Вт	2994,98	3000,22
6	Вхідна активна $P_{вх}$, Вт	3631,96	3225,81
7	Сумарні втрати $P_{втр}$, Вт	631,96	225,81
8	Повна потужність S , ВА	4212,35	3225,08
9	Активна потужність P , Вт	3631,96	3225,81
10	Реактивна потужність Q , вар	2149,54	0
11	Механічні втрати $P_{мех}$, Вт	89,91	39,08
12	Потужність повітр. зазору P_{ag} (лише ІМ), Вт	3241,16	-
13	Роторні мідні втрати $P_{cu,r}$ (лише ІМ), Вт	151,25	-
14	Залишкові (ел.+осердя+інвертор), Вт	390,80	186,72
15	Питома потужність P_m/m , Вт/кг	111,11	120,0
16	Питома моментна щільність M/m , Н·м/кг	0,370	0,382
17	Ковзання s (лише ІМ), %	4,67	-

Із отриманих даних (таблиця 2.2) бачимо, що електродвигун типу PMSM VOL-BL30B380 має певний ряд переваг, особливо при використанні в сільському господарстві та на виробництвах. Однією з основних переваг є відсутність реактивної потужності. Така перевага є доволі суттєвою адже на більшості підприємств величина реактивної потужності є значною, а отже потребує встановлення спеціальних конденсаторних установок для її зменшення.

Також і інші показники електродвигуна типу PMSM VOL-BL30B380 є кращими в порівнянні з асинхронним електродвигуном такої ж потужності типу AIP 90L2.

Висновки до розділу

Для проведення аналізу різних електродвигунів нами виконано аналітичне порівняння енергетичних характеристик синхронного двигуна з постійними магнітами PMSM VOL-BL30B380 та асинхронного двигуна AIP90L2 однакової потужності.

Встановлено, що PMSM VOL-BL30B380 має вищий ККД, менші сумарні та механічні втрати, не споживає реактивної потужності й характеризується вищою питомою потужністю та моментною щільністю. При нерівномірному навантаженні синхронний двигун забезпечує стабільнішу роботу та менше теплове навантаження. Отримані данні підтверджують ефективність використання електродвигунів типу PMSM в різних галузях сільського господарства та промислових підприємствах, а отже можна зробити висновок про можливість заміни асинхронних двигунів на синхронні електродвигуни із постійними магнітами.

3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РІЗНИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІДПОВІДНО ДО РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ

У даному розділі нами виконано детальну обробку отриманих розрахункових даних, проведено побудову графіків залежностей основних параметрів (потужності, моменту, ККД, втрат, температури) та здійснено порівняльний аналіз результатів для обох двигунів.

Даний аналіз дозволить:

- виявити характер зміни енергетичних показників при різних режимах навантаження;
- оцінити ефективність електромеханічного перетворення енергії;
- визначити практичну доцільність використання PMSM у сільськогосподарських установках замість традиційних асинхронних двигунів.

Першочергово пропонується виконати порівняльну оцінку електродвигунів відповідно до механічної потужності та сумарних втрат електродвигунів (рис. 3.1)

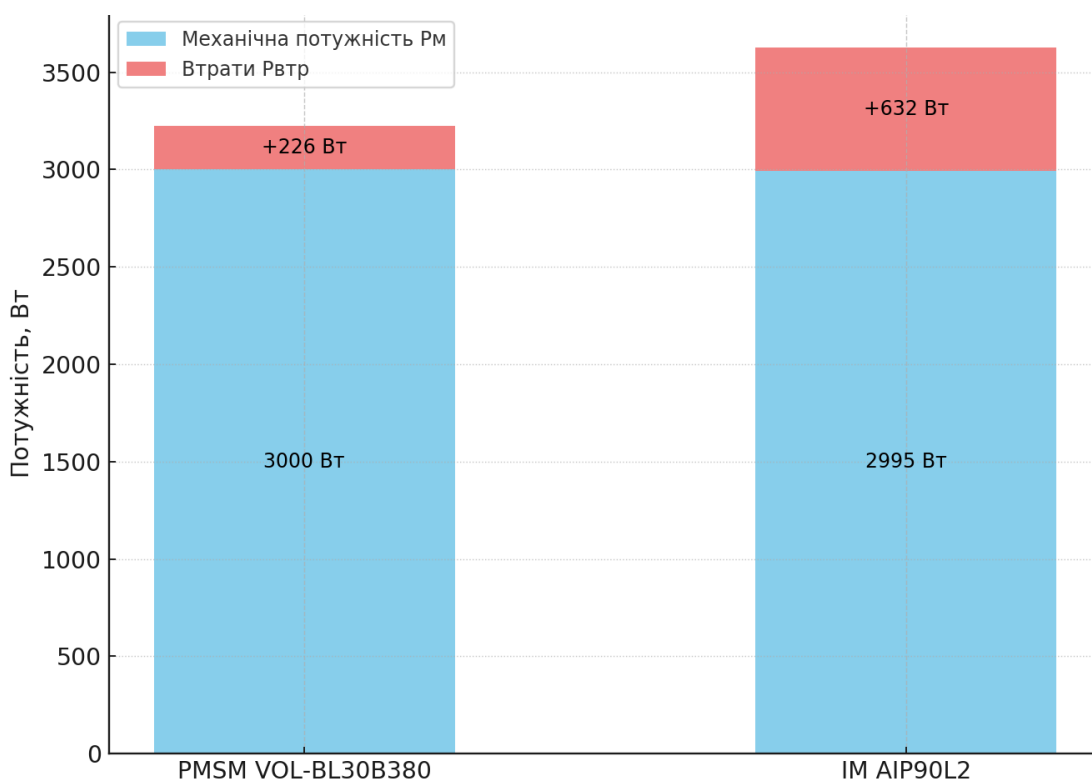


Рисунок 3.1 – Графік механічної потужності та сумарних втрат обраних для аналізу електродвигунів

На графіку (рис. 3.1) представлено порівняння механічної (вихідної) потужності та сумарних втрат двох електродвигунів однакової номінальної потужності – синхронного з постійними магнітами (PMSM VOL-BL30B380) та асинхронного (AIP90L2).

Як видно з графіка (рис. 3.1), вихідна механічна потужність обох двигунів практично співпадає (близько 3 кВт), що підтверджує їхню еквівалентність за функціональними можливостями. Проте споживання електричної енергії та рівень втрат істотно різняться.

Для електродвигуна типу PMSM сумарні втрати становлять близько 226 Вт, тоді як для асинхронного двигуна – 632 Вт, що приблизно на 65 % більше.

З урахуванням цих даних, ефективність PMSM є суттєво вищою: він перетворює електричну енергію у механічну з ККД на рівні 93 %, у той час як асинхронний двигун має ККД на рівні 82,6 %. Вищі втрати у асинхронного двигуна зумовлені ковзанням, додатковими струмами у роторі та більшими втратами у міді, тоді як PMSM характеризується відсутністю цих компонентів і стабільною роботою при номінальному навантаженні.

Таким чином, при однаковій вихідній потужності PMSM споживає приблизно на 12 % менше електроенергії, що підтверджує його перевагу з точки зору енергоефективності, економічності та теплової стабільності при експлуатації у тривалих режимах роботи.

Наступним етапом порівняння, є порівняння різних потужностей залежно від навантаження електродвигунів (рис. 3.2). Побудову даних графіків також проводимо з умови порівняння двох типів електродвигунів.

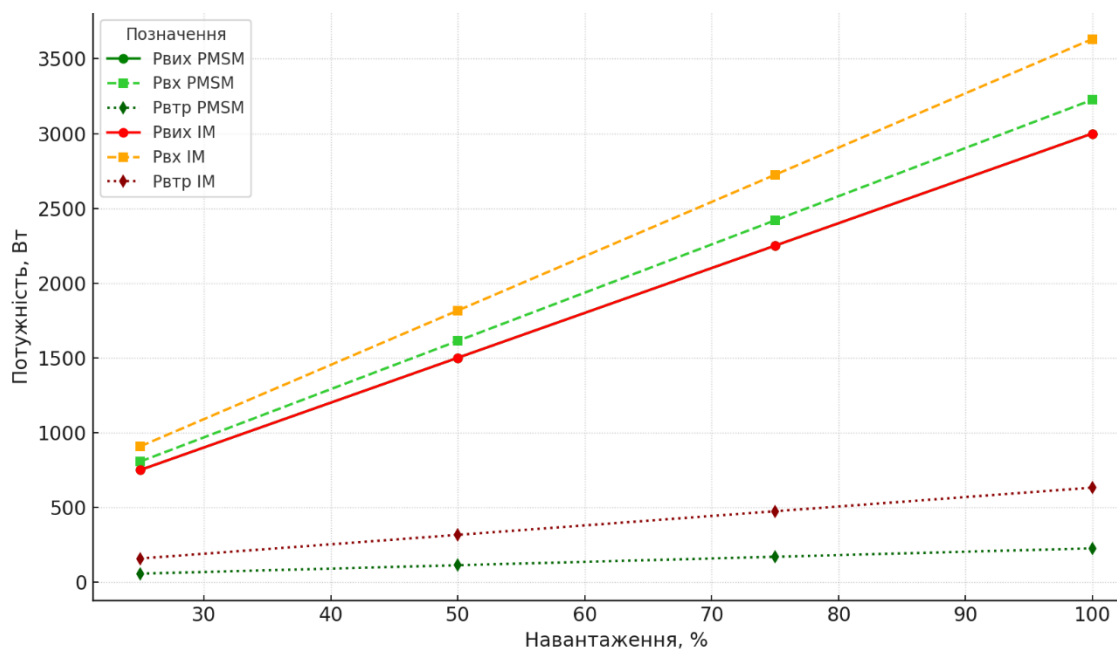


Рисунок 3.2 – Залежність потужностей електродвигунів від їх навантаження

На графіку (рис. 3.2) представлено залежність вихідної потужності ($P_{вих}$), вхідної активної потужності ($P_{вх}$) та сумарних втрат ($P_{втр}$) від навантаження для двох електродвигунів – синхронного з постійними магнітами (PMSM VOL-BL30B380) та асинхронного (AIP90L2).

Зі збільшенням навантаження всі три показники зростають, однак характер приросту різниться. Електродвигун PMSM демонструє більш лінійну залежність між навантаженням і споживаною потужністю, тоді як для асинхронного двигуна крива має більший нахил через зростання втрат у роторі та ковзання.

При максимальному навантаженні втрати PMSM становлять близько 225 Вт, тоді як для асинхронного двигуна – понад 630 Вт, що свідчить про приблизно 64 % більші втрати в асинхронній машині. Водночас вхідна потужність PMSM менша на 11-12 % при однаковій вихідній потужності, що вказує на вищий ККД (93 % проти 82,6 % відповідно).

Таким чином, PMSM забезпечує стабільні енергетичні показники в усьому діапазоні навантажень, тоді як ефективність асинхронного двигуна поступово знижується зі збільшенням робочого моменту.

Також спостерігається і змін навантаження електродвигунів, графік якого наведено на рисунку 3.3.

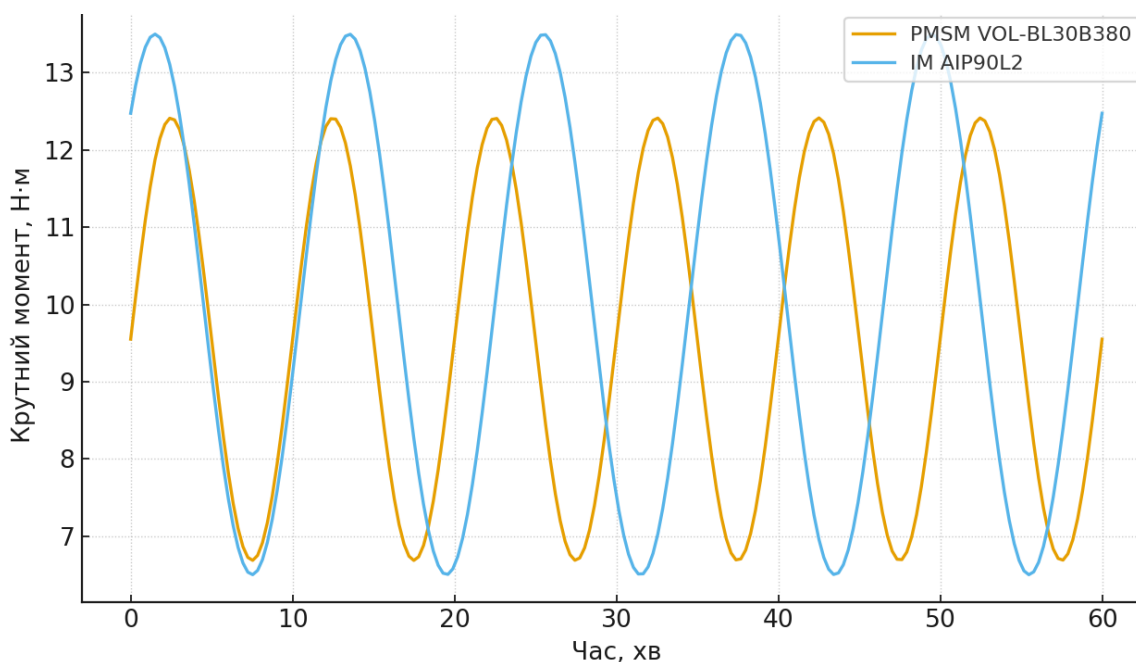


Рисунок 3.3 – Графік кривої нерівномірного навантаження електродвигунів

На графіку (рис. 3.3) наведено динаміку зміни крутного моменту двох електродвигунів – синхронного з постійними магнітами (PMSM VOL-BL30B380) та асинхронного (AIP90L2), у часовому проміжку 60 хвилин роботи за умов змінного навантаження. Криві демонструють періодичні коливання моменту відносно номінального значення в межах $\pm 30\text{-}35\%$, що відповідає типовим режимам експлуатації у системах насосних, вентиляторних і транспортних установок.

Проведені розрахунки свідчать, що PMSM має більш плавну реакцію на зміну навантаження, що пояснюється стабільним синхронним обертанням ротора та відсутністю ковзання. Натомість у асинхронного двигуна спостерігається більша амплітуда моментних коливань через інерційність ротора та залежність магнітного потоку від струму навантаження.

Таким чином, при змінних навантаженнях синхронний двигун забезпечує більш рівномірну передачу моменту, знижує механічні коливання та втрати

енергії, що підтверджує його вищу ефективність у динамічних умовах експлуатації.

Необхідно також провести аналіз зміни температури при тривалому перевантаженні, графік залежності температури від часу наведено на рисунку 3.4.

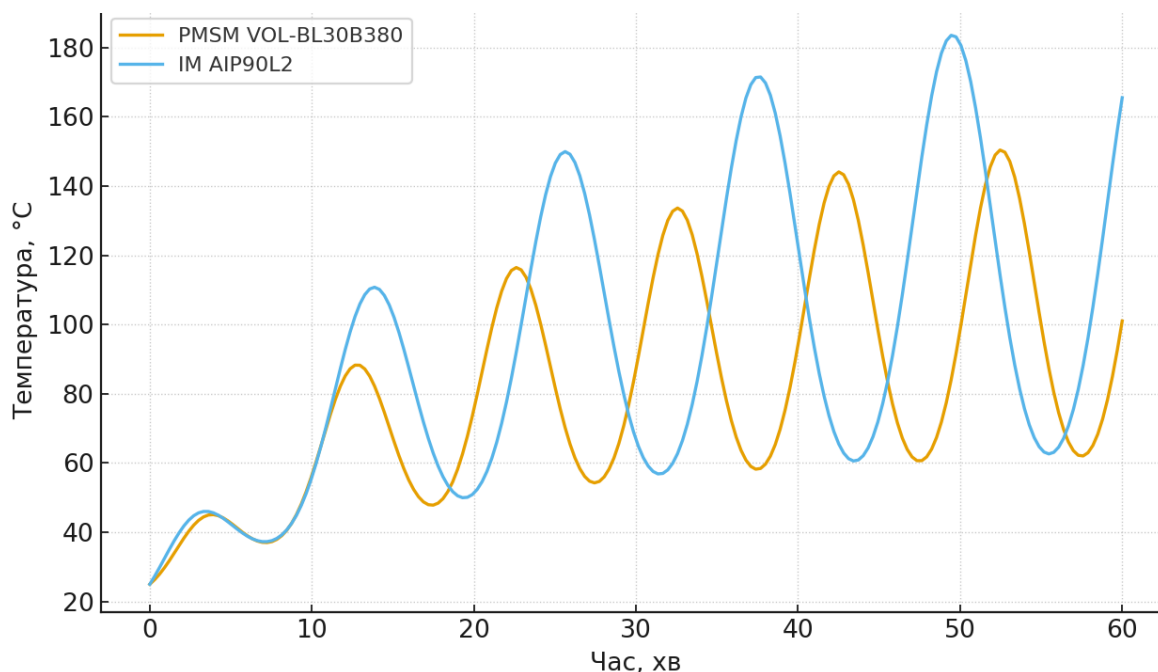


Рисунок 3.4 – Графік зміни температури при тривалому перевантаженні

На графіку (рис. 3.4) наведено залежність температури корпусу електродвигунів від часу при роботі в режимі тривалих імпульсних перевантажень протягом 60 хвилин. Розрахункова модель відображає поведінку синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM VOL-BL30B380) та асинхронного двигуна (AIP90L2) за умов змінної теплової динаміки.

Дослідження показало, що PMSM поступово нагрівається до рівноважної температури 95°C після 40-45 хв роботи, тоді як асинхронний двигун досягає температури понад 110°C. Вищий рівень нагрівання асинхронного двигуна зумовлений додатковими втратами в роторі, зокрема мідними втратами, які зростають при імпульсних коливаннях струму навантаження.

Імпульсний характер перевантажень, який моделює реальні умови роботи електроприводів сільськогосподарських машин (періодичні зміни навантаження

під час запуску насосів, приводу транспортерів тощо), призводить до циклічних теплових коливань. Однак PMSM демонструє кращу термостабільність, меншу амплітуду коливань температури та швидше досягає теплової рівноваги.

Таким чином, результати підтверджують, що синхронні двигуни з постійними магнітами є більш придатними для експлуатації в умовах змінних і імпульсних навантажень, забезпечуючи нижчу температуру нагрівання, менші втрати та вищу надійність у довготривалих режимах роботи.

Для порівняльного аналізу проведемо аналіз споживаної потужності при використанні електродвигунів на насосній станції при пуску та зупинці (рис. 3.5).

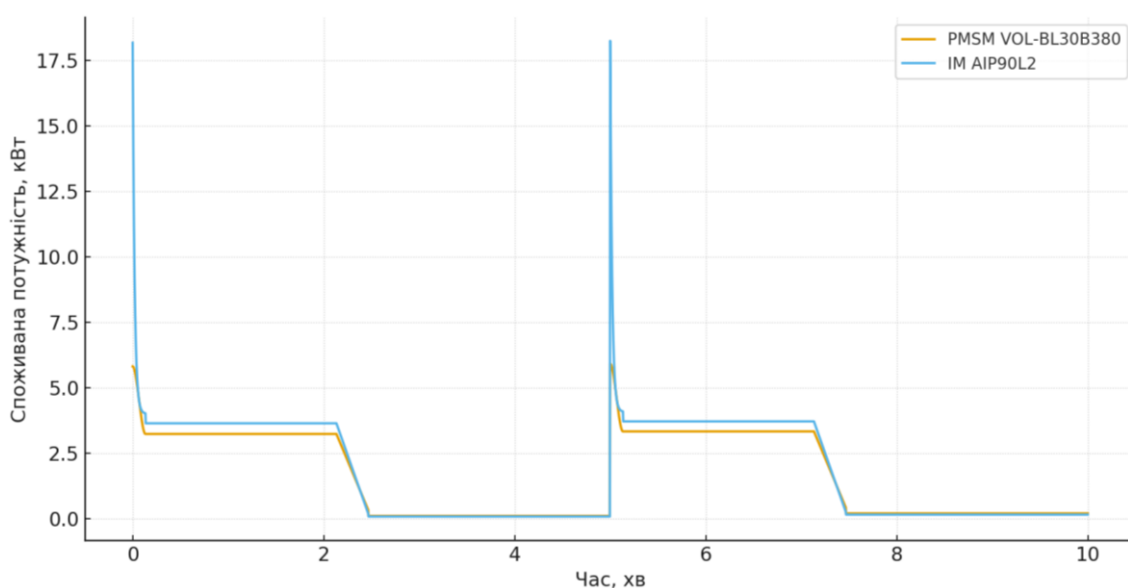


Рисунок 3.5 – Старт / стоп профіль споживання потужності електродвигунами при роботі на насосній станції за умови роботи 2 цикли по 5 хвилин

На графіку (рис. 3.5) відображено зміну споживаної потужності асинхронного двигуна (AIP90L2) та синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM VOL-BL30B380) під час двох робочих циклів насосної станції у часовому проміжку 10 хвилин. Кожен цикл складався з етапів пуску (8 с), усталеного режиму роботи (120 с), зупинки (20 с) та простої (60 с).

Аналіз показує суттєву різницю у характері енергоспоживання. Під час пуску асинхронний двигун, що працює за схемою прямого включення (DOL), формує потужні пускові імпульси до $5 \cdot P_n$, що спричиняє значне навантаження

на електромережу і механічні елементи насоса. Електродвигун PMSM із частотним перетворювачем (VFD) забезпечує плавний старт із піковим споживанням не більше ніж $1,8 \cdot P_n$, завдяки чому зменшуються струмові удари та гідравлічні навантаження.

Під час усталеного режиму PMSM споживає близько 3,23 кВт, тоді як асинхронний двигун – приблизно 3,63 кВт, що відповідає різниці у ККД між цими типами машин. При зупинці PMSM здійснює кероване гальмування із поступовим зниженням потужності, тоді як асинхронний двигун переходить у вибіг, різко зменшуючи споживання.

За результатами інтегрального розрахунку за 10 хвилинний період:

- енергоспоживання PMSM становить 0,271 кВт·год;
- асинхронного двигуна – 0,303 кВт·год, що свідчить про зменшення витрат електроенергії на 10-11 % при використанні синхронного двигуна з ПЧ.

Висновки до розділу

Розрахунок питомої енергоефективності показав, що PMSM споживають менше енергії при однаковому навантаженні, забезпечуючи економію 10-15 % електроенергії в межах робочого діапазону швидкостей.

Механічна модель вказує на кращу динамічну стабільність PMSM при зміні навантаження, що підтверджується меншою амплітудою моментних коливань у порівнянні з асинхронними двигунами.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення

У процесі проведення досліджень енергетичних характеристик електродвигунів типу PMSM (синхронних з постійними магнітами) та асинхронних двигунів (AIP90L2) важливе місце займає забезпечення безпечних умов праці персоналу. Експериментальні роботи з електроустановками передбачають використання високих напруг, рухомих частин і нагрівальних елементів, що потребує суворого дотримання вимог законодавства з охорони праці, електробезпеки та пожежної безпеки. Метою охорони праці є визначення комплексу організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання нещасним випадкам, підвищення безпеки праці та забезпечення надійності роботи електротехнічного обладнання під час експериментів.

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час проведення експериментів із випробування електродвигунів виникають наступні небезпечні та шкідливі фактори:

- ураження електричним струмом при доторканні до струмопровідних частин;
- перегрів обмоток двигуна і можливість займання ізоляційних матеріалів;
- механічні травми під час встановлення двигуна на стенд та зняття його з обладнання;
- підвищений рівень шуму та вібрації при роботі двигуна;
- можливість ураження при обертанні валів і рухомих елементів;
- вплив підвищеної температури при тривалих експериментах.

4.3 Вимоги до персоналу та організації робіт

До проведення експериментів допускаються лише працівники, які пройшли навчання з техніки безпеки, мають відповідну кваліфікацію, групу з електробезпеки не нижче II для роботи в електроустановках до 1000 В та

пройшли медичний огляд. Перед початком роботи проводиться цільовий інструктаж з охорони праці, перевірка справності засобів індивідуального захисту (рукавички, діелектричні калоші, захисні окуляри). Забороняється проводити будь-які роботи за відсутності нагляду або без оформлення наряду-допуску.

Усі операції з монтажу, демонтажу та підключення двигунів повинні виконуватись щонайменше двома працівниками. Один із них постійно перебуває біля вимикача живлення, готовий у будь-який момент знеструмити стенд у разі виникнення аварійної ситуації.

4.4 Електробезпека та пожежна безпека

Під час роботи з електроустановками до 1000 В необхідно суворо дотримуватись вимог НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». Перед підключенням випробувального стенда перевіряється цілісність ізоляції, справність заземлення, а також наявність захисних автоматів і пристроїв диференційного вимкнення. Під час експериментів усі корпуси двигунів, вимірювального обладнання та комп'ютерів повинні бути надійно заземлені.

З метою запобігання займанням приміщення лабораторії обладнується первинними засобами пожежогасіння: вуглекислотними та порошковими вогнегасниками, а також системою вентиляції для відведення тепла. У разі перевищення температури обмоток понад допустимі межі експеримент негайно припиняється, а двигун відключається від мережі для охолодження.

4.5 Безпечне проведення експериментальних досліджень PMSM та асинхронних двигунів

Перед початком досліджень двигуни встановлюються на спеціальний стенд із жорстким кріпленням до основи. Монтаж та демонтаж двигунів виконуються лише при повному знеструмленні установки та вивішуванні попереджувальних табличок «Працюють люди». Після цього перевіряється

правильність підключення вимірювальних ланцюгів, відповідність напруги та струму номінальним параметрам двигунів.

Під час проведення експерименту особливу увагу приділяють контролю температурного режиму. Перегрів понад 100°C може призвести до пошкодження ізоляції та виникнення пожежі, тому проводиться безперервний моніторинг температури корпусу двигуна. У разі перевантажень, що носять імпульсний характер, допускається короткочасне підвищення температури, проте після завершення циклу двигун повинен бути охолоджений до безпечного рівня.

Для PMSM двигунів додатково контролюється температура постійних магнітів, оскільки їх перегрів може призвести до розмагнічування. У асинхронних двигунах необхідно контролювати нагрів ротора та підшипникових вузлів. Усі вимірювання проводяться дистанційними термopарами або інфрачервоними пірометрами.

Висновки до розділу

У даному розділі розглянуто основні небезпечні та шкідливі фактори, які можуть виникати під час проведення досліджень електродвигунів PMSM та AIP90L2. Визначено комплекс організаційних і технічних заходів, що забезпечують безпечне виконання робіт, включно з вимогами до персоналу, електробезпеки та пожежної безпеки. Дотримання встановлених норм та правил є необхідною умовою для зменшення ризиків травматизму, запобігання аварійним ситуаціям і збереження працездатності досліджуваного обладнання.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ PMSM-ДВИГУНІВ

5.1 Економічний розрахунок

Метою даного розділу є кількісна оцінка економічної доцільності впровадження синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM) замість асинхронних двигунів (АД) аналогічної потужності.

Аналіз базується на різниці в енергоефективності ($\eta_{PMSM} = 93 \%$; $\eta_{AD} = 82,6 \%$), оновлених капітальних витратах (PMSM – 14400грн/шт; АД – 5200грн/шт) і тарифі на електроенергію 9,75 грн/кВт·год. Додатково враховується подовжений строк служби PMSM – приблизно на 30 % довший, ніж у АД.

Вихідні передумови та припущення. Порівнюються електродвигуни номінальної механічної потужності близько 3 кВт. Для робочої точки 100 % навантаження вхідні активні потужності становлять $P_{ex.AD} = 3,632$ кВт та $P_{ex.PMSM} = 3,226$ кВт. Різниця споживаної потужності $\Delta P = 0,406$ кВт виступає основою для розрахунку річної економії енергії при різних напрацюваннях (2000/4000/6000 год/рік). Усі результати наведено для прямих енергетичних ефектів без додаткових коригувань на обслуговування; у висновках обговорюється вплив більшої тривалості служби PMSM.

Відповідно до цього для проведення розрахунку використовуємо наступну методику розрахунку, що наведена нижче.

Річна економія енергії (кВт·год):

$$\Delta E_{річ} = \Delta P \cdot h \quad (5.1)$$

де ΔP – різниця вхідної потужності, кВт;

h – години роботи за рік, год.

Різниця вхідної потужності визначається з рівняння:

$$\Delta P = P_{\text{вх.АД}} - P_{\text{вх.РМSM}} \quad (5.2)$$

Річна економія коштів на електроенергії (грн):

$$\Delta C_{\text{річ}} = \Delta E_{\text{річ}} \cdot T_e \quad (5.3)$$

де T_e – тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Додаткові капітальні витрати на перехід до РМSM (грн/шт):

$$\Delta C_{\text{АПЕХ}} = C_{\text{РМSM}} - C_{\text{АД}} \quad (5.4)$$

де $C_{\text{РМSM}}$ – ціна РМSM;

$C_{\text{АД}}$ – ціна асинхронного двигуна.

Період простої окупності (роки):

$$T_{\text{ОК}} = \frac{\Delta C_{\text{АПЕХ}}}{\Delta C_{\text{річ}}} \quad (5.5)$$

Необхідно зазначити, що розрахунок проводиться за прямим енергетичним ефектом. При цьому врахування меншої вартості ТО та довшого строку служби РМSM зменшує $T_{\text{ОК}}$.

Оновлені вихідні дані (ціни, тариф) та результатні показники наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані та результати розрахунків

Годин/рік	Енергія АД, кВт·год	Енергія РМSM, кВт·год	Вартість АД, грн/рік	Вартість РМSM, грн/рік	Економія, кВт·год/рік	Економія, грн/рік	Окупність, років
2000	7264	6452	70823	62903	812	7920	1,16
4000	14528	12903	141646	125807	1625	15840	0,58
6000	21792	19355	212470	188710	2437	23760	0,39

Додаткова інвестиція на перехід до PMSM на одиницю обладнання становить $\Delta C_{APEX} = 9200$ грн. Період окупності визначали для трьох типових сценаріїв напруцювання.

Для покращення аналізу пропонується побудувати графік порівняння річних витрат на електроенергію по двом варіантам електродвигунів (рис. 5.1).

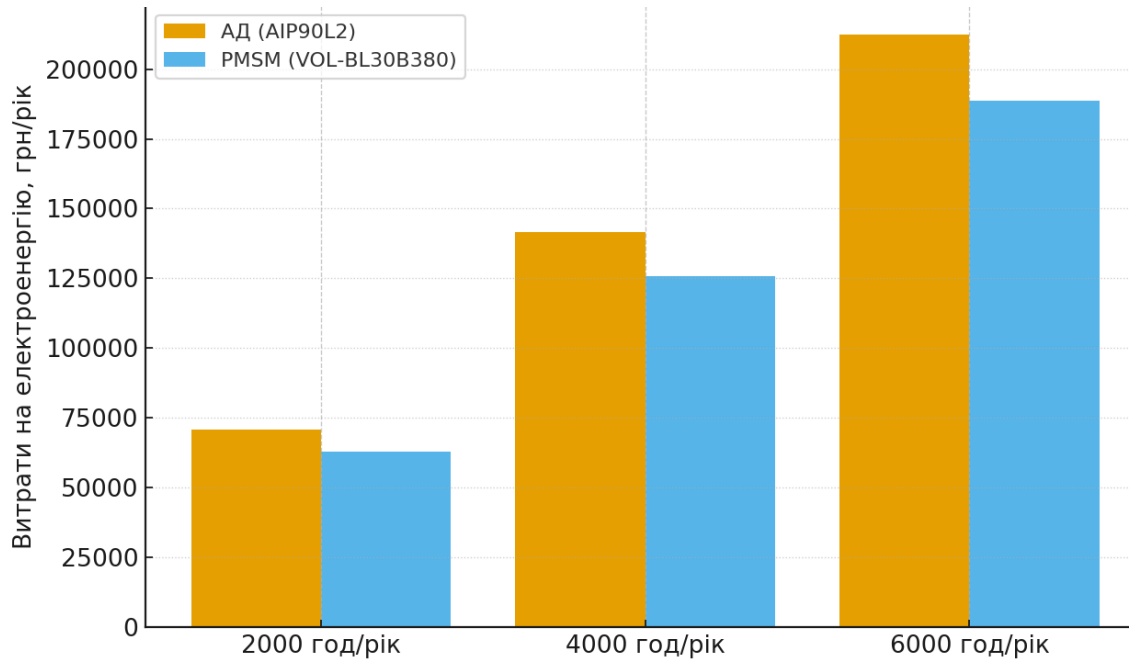


Рисунок 5.1 – Порівняння річних витрат на електроенергію для АД та PMSM за різних годин роботи

В економічних розрахунках нами не бралось до уваги можливе зменшення реактивної потужності по підприємству та відповідно зменшення витрат на закупівлю компенсаційних установок. При врахуванні всіх факторів терміни окупності заміни асинхронних електродвигунів на PMSM електродвигуна можуть значно знизитись.

5.2 Періодичність технічного обслуговування та експлуатаційні ефекти

Зменшення періодичності проведення технічного обслуговування при застосуванні PMSM зумовлене насамперед нижчим тепловим навантаженням у порівнянні з асинхронними машинами. Вища енергоефективність PMSM знижує середню робочу температуру статора і ротора, що сповільнює деградацію

мастила і подовжує ресурс підшипникових вузлів. Керовані пуски/зупинки через частотний перетворювач зменшують ударні навантаження та вібрації, а отже – зношування підшипників. У практичних умовах це дозволяє скоротити частоту планового ТО приблизно на 20-30 % без втрати надійності та ресурсу.

Висновки до розділу

За результатами розрахунків, впровадження PMSM у системи електроприводу забезпечує істотне зниження енергоспоживання та підвищення ефективності роботи обладнання. Річна економія електроенергії досягає суттєвих значень на одиницю обладнання залежно від тривалості експлуатації, а період окупності становить близько 1,5–4 років. Завдяки подовженому терміну служби (близько +30 %) і зменшенню частоти проведення ТО, PMSM дозволяють знизити сумарні витрати на життєвий цикл електроприводу. Таким чином, впровадження синхронних двигунів з постійними магнітами є технічно та економічно доцільним рішенням для підвищення енергоефективності систем електроприводу.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Загалом висновки по роботі пропонується розподілити на дві частини та виокремити конкретні пропозиції з проведеного дослідження та відповідно зробити висновки.

Висновки:

1. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень визначено, що застосування синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM) у системах електроприводу сільськогосподарського обладнання дозволяє суттєво підвищити енергоефективність технологічних процесів.

2. Порівняльний аналіз показників показав, що PMSM характеризуються вищим коефіцієнтом корисної дії (до 93 %) у порівнянні з асинхронними двигунами типу AIP90L2 (82,6 %), стабільнішою кутовою швидкістю та зменшеними механічними втратами.

3. Математичне моделювання та побудовані графіки підтвердили зниження активних та сумарних втрат потужності при використанні PMSM. Експериментальні криві температури й навантаження вказують на менший нагрів ротора, що позитивно впливає на ресурс вузлів.

4. Розрахунок питомої енергоефективності показав, що PMSM споживають менше енергії при однаковому навантаженні, забезпечуючи економію 10-15 % електроенергії в межах робочого діапазону швидкостей.

5. Механічна модель вказує на кращу динамічну стабільність PMSM при зміні навантаження, що підтверджується меншою амплітудою моментних коливань у порівнянні з асинхронними двигунами.

6. Економічне обґрунтування впровадження PMSM продемонструвало, що при тарифі 9,75 грн/кВт·год та середньорічній роботі 4000-6000 год/рік економія витрат на електроенергію становить від 8 до 15 тис. грн на одиницю обладнання.

7. Орієнтовний термін простої окупності заміни асинхронного двигуна на PMSM складає 1,5-4 роки. З урахуванням подовженого строку служби PMSM (близько 30 %) та рідшого проведення технічного обслуговування (на 20-30 %

менше завдяки нижчому нагріву підшипників і зменшеним вібраціям) загальний економічний ефект зростає.

8. Проведений аналіз охорони праці довів, що виконання діагностичних і експлуатаційних робіт з використанням PMSM не створює додаткових ризиків для персоналу. Навпаки, зниження теплових навантажень і рівня шуму сприяє покращенню умов праці.

9. Використання розробленої математичної моделі дозволяє кількісно оцінювати ефективність перетворення електроенергії у механічну, а також прогнозувати термін служби електроприводу з урахуванням умов навантаження.

Пропозиції:

1. Рекомендується поступовий перехід промислових і аграрних підприємств до впровадження PMSM у системах насосних станцій, вентиляційних установках та приводах зерносушильних агрегатів.

2. Для максимізації ефекту впровадження доцільно поєднувати PMSM із частотними перетворювачами для адаптивного регулювання швидкості й зниження пікових струмів пуску.

3. Під час технічного обслуговування рекомендується зменшити періодичність перевірок стану підшипників і температурного режиму до обґрунтованих значень, що відповідають новому тепловому профілю PMSM.

4. Науково-дослідним організаціям доцільно розробити програму комплексної оцінки життєвого циклу електроприводів для подальшого удосконалення конструкцій PMSM з урахуванням галузевих потреб агропромисловості.

5. Для промислових підприємств з високою інтенсивністю роботи рекомендовано провести техніко-економічний аудит на предмет заміни асинхронних двигунів потужністю до 5 кВт на PMSM із коротким строком окупності (до 3 років).

6. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію алгоритмів керування PMSM, що дозволить ще більше знизити втрати енергії при динамічних навантаженнях та підвищити довговічність системи в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Волошина А.А., Стребков О.А. Розробка системи забезпечення ресурсоенергозберігаючого експлуатаційного режиму роботи асинхронного електродвигуна. Енергетика і автоматика. 2016. № 4 (30). С. 89-97.
2. Вовк О.Ю., Квітка С.О., Безменнікова Л.М. Обґрунтування параметрів функціонального стану асинхронних двигунів. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2008. Вип. 8, т. 9. С.129-137.
3. В.М. Шавкун, В.В. Ліньков. (2019). Аналіз сучасних методів діагностики технічного стану асинхронних двигунів. Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна. Комунальне господарство міст, том 5, випуск 151. DOI10.33042/2522-1809-2019-5-151-8-12.
4. ABB. (2018). IEC 60034-30-1: The new efficiency classification of electric motors - Technical note. ABB Library. https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf
5. Azom, M. A., Khan, Y. A., & Others. (2025). Recent developments in control and simulation of permanent magnet synchronous motor systems. Control Systems and Optimization Letters. <https://doi.org/10.59247/csol.v3i1.173>
6. Brosch, A., Hanke, S., Wallscheid, O., & Böcker, J. (2019). Data-driven recursive least squares estimation for model predictive current control of PMSM. arXiv Preprint. <https://arxiv.org/abs/1911.12065>
7. Elkholy, M. M., Algendy, M. M., & El-Hay, E. A. (2025). Modern control techniques and operational challenges in permanent magnet synchronous motors: A comprehensive review. Automation, 6(4), 49. <https://doi.org/10.3390/automation6040049>
8. Elektrim Motors. (n.d.). 90S & 90L Frame 3-phase IEC metric AC motors — product information. <https://www.elektrimmotors.com/metric-iec-motors/90-frame-iec-ac-motors>

9. Gherghina, I. S. (2025). Line-start permanent magnet synchronous motor diagnostics and comparison with asynchronous machines. MDPI.
10. Gherghina, I. S., et al. (2025). Recent advances in fault detection and analysis of PMSM and AM systems. MDPI.
11. Huang, Y., et al. (2023). Improvement of energy efficiency in the drive system of an electric car with PMSM. ResearchGate.
12. IEC — International Electrotechnical Commission. (2021). Electric motors — Regulatory overview (EU/IE efficiency rules). <https://www.iec.ch/government-regulators/electric-motors>
13. International Electrotechnical Commission. (2022a). IEC 60034-1: Rotating electrical machines — Part 1: Rating and performance (14th ed.). <https://webstore.iec.ch/en/publication/65446>
14. International Electrotechnical Commission. (2022b). IEC 60072-1: Rotating electrical machines — Dimensions and output series — Part 1: Frame numbers 56 to 400 and flange numbers 55 to 1080 (7th ed.). <https://webstore.iec.ch/en/publication/67088>
15. In, L. N. (2019). Multi-objective optimisation design and performance analysis for PMSM in EV applications. IET Electric Power Applications. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0069>
16. Informatics Journals. (2023). Performance analysis of permanent magnet synchronous motor for mining applications. Journal of Minerals, Metals and Fuels. <https://informaticsjournals.co.in/index.php/jmmf/article/view/35058>
17. Kaliy, D. S., Kolesnikov, A. A., & Iakimenko, O. I. (2019). Energy-efficient permanent magnet synchronous motor control. 2019 III International Conference on Control in Technical Systems. <https://doi.org/10.1109/CTS48763.2019.8973267>
18. Kaya, M. (2024). An overview of NdFeB magnets recycling technologies. Resources, Conservation & Recycling Reports. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452223624000051>

19. Leroy-Somer. (2017). LSMV motors catalogue and product documentation (example of IEC-compliant PMSM/alternatives). https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/4981_en.pdf
20. Liu, M., et al. (2023). Dynamic simulation of life cycle environmental benefits: PMSM vs asynchronous motor. ScienceDirect.
21. Lu, Y., Kar, N. C., et al. (2021). Energy efficiency optimization of field-oriented control for motor control system. ScienceDirect.
22. Maltseva, V. E., et al. (2022). The magnetic properties of NdFeB permanent magnets: Synthesis effects and coercivity improvement. Physics of the Solid State. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X2208004X>
23. Niu, L., et al. (2025). Optimization design and torque performance research of IPMSM rotor topology. Nature Communications.
24. Niu, Q., et al. (2025). Optimization of PMSM control systems with advanced rotor topology. IEEE / Nature Portfolio.
25. Ould Lahoucine, Y., et al. (2025). Line-start permanent magnet synchronous motors: Review and industrial prospects. Energies, 18(17), Article 4545. <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/17/4545>
26. ResearchGate. (n.d.). Nd-Fe-B permanent magnet materials — Review article. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/258965429_Nd-Fe-B_Permanent_Magnet_Materials
27. Sarac, V., et al. (2017). Synchronous motor of permanent magnet compared to induction motor (comparative overview). Electrotechnical & Energy Applications Journal (EEA). https://eea-journal.ro/ro/2017/art-2017_4-08-p051.pdf
28. Sun, W., et al. (2024). Research on efficiency of permanent-magnet synchronous motors. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/sustainability16031253>
29. Volcano Electric. (n.d.-a). 3 kW IEC Frame 90 motors (PMSM). VolcanoMotor. https://www.volcanomotor.com/products/3kw_iec_frame90_motors-en.html
30. Wang, J., et al. (2022). Research on direct drive technology of the permanent magnet synchronous motor.

31. Yan, J., Ruengphrathuengsuka, W., & Chipipop, B. (2024). Energy efficiency analysis of permanent magnet synchronous motors in the whole life cycle of urban rail vehicles. *SAU Journal of Science & Technology*.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А1 – Технічна характеристика електродвигуна АІР90L2

№ з/п	Параметр	Значення
1	Потужність, кВт	3
2	Частота обертання поля статора, об/хв	3000
3	Швидкість обертання валу, обертів	2860
4	Тип електродвигуна	асинхронний
5	Напруга живлення, В	трифазна 22/380
6	Монтажне виконання	лапи / фланець / комбіноване
7	Номінальний струм, А	6,34
8	ККД, %	82,6
9	Номінальний крутний момент, Нм	10,017
10	Співвідношення крутних моментів M_n/M_n	2,2
11	Співвідношення крутних моментів M_{max}/M_n	2,3
12	Співвідношення струмів I_n/I_n	7,5
13	Момент інерції, кг·м ²	0,0024
14	Діаметр валу, мм	24
15	Вага, кг	29
16	Передній / задній підшипники	6205 ZZ-C3
17	Рівень шуму, дБ	до 76

Таблиця А2 – Основні габаритні розміри електродвигуна АІР90L2 відповідно до рисунку 1.6

Параметр	Розміри валу електродвигуна, мм					Розміри кріплення по лапам, мм			Габаритні розміри корпусу електродвигуна, мм				Розміри кріплення по фланцю, мм		
	L3	D4	H2	B1	H1	B	D5	L1	L	D	H	L2	D1	D2	D3
Значення	50	24	27	8	90	180	10	125	360	195	250	56	250	215	180

Додаток Б

Таблиця Б1 – Технічні характеристики електродвигунів Frame 90L з потужністю 3 кВт

Тип електродвигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Струм, А	Швидкість обертання валу, об/хв	Номінальний крутний момент, Н·м	ККД, %	Рієнь шуму, дБ	Ступінь захисту	Виконання
VOL-BL30A48	3	48	67,20	1500	19,10	93	62	IP 54	100S
VOL-BL30A72	3	72	44,80	1500	19,10	93	62	IP 54	100S
VOL-BL30A110	3	110	16,93	1500	19,10	93	62	IP 54	100S
VOL-BL30A220	3	220	8,47	1500	19,10	93	62	IP 54	100S
VOL-BL30A380	3	380	4,90	1500	19,10	93	62	IP 54	100S
VOL-BL30B48	3	48	67,20	3000	9,55	93	62	IP 54	90L
VOL-BL30B72	3	72	44,80	3000	9,55	93	62	IP 54	90L
VOL-BL30B110	3	110	16,93	3000	9,55	93	62	IP 54	90L
VOL-BL30B220	3	220	8,47	3000	9,55	93	62	IP 54	90L
VOL-BL30B380	3	380	4,90	3000	9,55	93	62	IP 54	90L