

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

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри енергетики
та електротехнічних систем

доцент Чепіжний А.В.

ДИПЛОМНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження особливостей та методів
штучного навантаження різних асинхронних
електродвигунів»

Виконав

(підпис)

Тесленко О.В.
(прізвище, ініціали)

Група

ЗЕТЕС 2301м

(Науковий) керівник:

(підпис)

Чепіжний А.В.
(прізвище, ініціали)

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

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент _____ Чепіжний А.В.
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 202_ року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Тесленко Олена Володимирівна

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження особливостей та методів штучного навантаження різних асинхронних електродвигунів»

керівник роботи: Чепіжний Андрій Володимирович, к.т.н. доцент

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

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «06» 11 2024 р. № 3738/ос

2. Термін подання здобувачем закінченої роботи «11» 11 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи показники роботи асинхронних електродвигунів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти,

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

1 Аналіз основних особливостей та способів діагностування асинхронних електричних двигунів.

2 Методика та засоби випробувань асинхронних двигунів для визначення теплових характеристик.

3 Аналіз результатів випробувань та оцінка теплових характеристик асинхронних електродвигунів.

4 Охорона праці.

5 Економічне обґрунтування.

Висновки та пропозиції.

Список використаної літератури.

Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 15.08.2024 р.	
2	Складання плану роботи	до 23.08.2024 р.	
3	Написання вступу	до 26.08.2024 р.	
4	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 28.08.2024 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 16.09.2024 р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 14.10.2024 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 4»	до 21.10.2024 р.	
8	Написання висновків та пропозицій	до 28.10.2024 р.	
9	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2024 р.	
10	Подання роботи на рецензування	до 05.11.2024 р.	
11	Подання до попереднього захисту	до 12.11.2024 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

(Тесленко О.В.)

(прізвище, ініціали)

**(Науковий) керівник
дипломної роботи**

(підпис)

(Чепіжний А.В.)

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Дослідження особливостей та методів штучного навантаження різних асинхронних двигунів. Магістерська робота / Тесленко Олена Володимирівна – Суми: СНАУ, 2024 р. – 52 с.

В роботі проведено аналіз основних існуючих методів дослідження стану асинхронного електродвигуна з використанням методів штучного навантаження різних асинхронних електричних двигунів. Проведено їх порівняльний аналіз та вибрано для аналізу найбільш кращий метод, що включає дослідження теплового стану асинхронного електродвигуна.

Сформовано методику проведення експериментальних досліджень з визначення теплового нагріву при використанні методів штучного навантаження та застосування попереднього тепловізійного обстеження.

Проведено експериментальні дослідження нагріву електричного двигуна в різних режимах несиметрії напруги та виконано порівняння з показниками роботи в номінальному режимі роботи. Отримані данні підтверджено за умови використання попереднього тепловізійного обстеження при використанні методу штучного навантаження.

Наведено заходи з охорони праці та виконано аналіз основних небезпечних факторів. Проведено аналіз основних вимог до проведення робіт з діагностики асинхронних двигунів методом штучного навантаження.

Виконано економічне обґрунтування запропонованого методу штучного навантаження та підтверджено ефективність його використання в сучасних умовах агропромислового виробництва.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, штучне навантаження, генератор, режим роботи, економічний ефект, нагрів, обмотка, статор, ротор.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА СПОСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ.....	9
1.1 Аналіз основних видів пошкодження асинхронних електричних двигунів.....	9
1.2 Дослідження пошкоджень АД отриманих під час виробництва та експлуатації АД.....	11
1.3 Механічна характеристика електродвигунів.....	13
1.4 Існуючі методи діагностики АД.....	16
1.5 Процес штучного навантаження АД.....	18
1.5.1 Методи прямого (безпосереднього) та непрямого визначення втрат і ККД.....	19
1.5.2 Методи безпосередньої (прямої) оцінки втрат та ефективності(ККД).....	20
1.5.3 Методи опосередкованого (непрямого) знаходження втрат і ККД.....	21
1.6 Визначення теплового режиму АД.....	22
Висновки до розділу.....	25
2 МЕТОДИКА ТА ЗАСОБИ ВИПРОБУВАНЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	26
2.1 Методика визначення теплових характеристик асинхронних електродвигунів.....	26
2.2 Особливості випробувальної схеми асинхронних двигунів.....	31
Висновки до розділу.....	34
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ ТА ОЦІНКА ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ.....	35
Висновок до розділу.....	40
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	41
Висновки до розділу.....	43

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	44
Висновки до розділу.....	48
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	51
ДОДАТОК А.....	54

ВСТУП

Актуальність теми. Основною проблемою використання асинхронних електродвигунів є необхідність проведення своєчасного ТО та ремонту. Необхідно зазначити, що електродвигуни в агропромисловому комплексі працюють в доволі складних умовах, що призводить до швидкого їх виходу з ладу. При цьому простої технологічного обладнання доволі сильно впливають на обробку сільськогосподарської продукції. В результаті тривалих простоїв обладнання призводить до значних втрат даної продукції, адже вона повинна оброблятися максимально швидко та якісно.

В результаті простоїв виникають доволі значні втрати коштів, а отже необхідною умовою є проведення вчасного ТО та ремонтів. Необхідно зазначити, що важливу складову має і час проведення ТО та ремонтів, а також їх якість. Більшість показників, що характеризують працездатність асинхронного двигуна виявити при його розбиранні неможливо. Виходячи з цього класична схема ремонту електричного двигуна з розбиранням виявляється затратною по часу, дороговартісною та в більшості випадків неефективною.

Виходячи з цього необхідною умовою є швидке та якісне визначення технічного стану асинхронних двигунів. Одним з таких методів є використання методу штучного навантаження. Але необхідно зазначити, що не всі електричні двигуни потрібно знімати та проводити подібно діагностику. Тож пропонується першочергово використання тепловізійного обстеження асинхронного електродвигуна для виявлення температурного відхилення без його знімання з технологічного обладнання чи лінії.

У випадку виявлення значного температурного відхилення за допомогою тепловізора пропонується подальшим кроком використання діагностування з використанням методу штучного навантаження. Даний метод дозволяє більш точно визначити пошкоджений елемент двигуна та усунути його.

Необхідно зазначити, що тепловізійне обстеження на початковому етапі дозволяє визначити такі нескладні проблеми, як неякісна робота підшипникових вузлів, чи інше.

В результаті подібного об'єднання двох методів час та вартість виконання ремонту електричного двигуна значно скорочується. В результаті отримуємо доволі гарну актуальність даної проблеми, особливо для умов агропромислового виробництва.

Мета та завдання дослідження. Головною метою роботи є вдосконалення методів діагностики АД шляхом застосування штучного навантаження та попереднього тепловізійного огляду. Це повинно підвищити ефективність ремонтів і технічного обслуговування, забезпечуючи безперервну роботу технологічного обладнання.

Послідовність вирішення задач:

- провести аналіз основних методів штучного навантаження та визначити найбільш ефективний;
- сформулювати методіку проведення експериментального дослідження процесів нагрівання асинхронних електродвигунів в різних режимах роботи;
- отримати дані нагрівання асинхронних двигунів в різних умовах експлуатації та з різними значеннями несиметрії напруги живлення;
- виконати аналіз заходів охорони праці відповідно до напрямку роботи;
- провести економічну ефективність використання запропонованого методу діагностування асинхронних двигунів.

Об'єктом дослідження в роботі є різноманітні несправності асинхронних двигунів та методи їх діагностування.

Предметом дослідження в роботі є використання різноманітних методів штучного навантаження для проведення діагностики несправностей асинхронних електричних двигунів.

Методи дослідження. Дослідження в магістерській роботі проводились з використанням математичних та експериментальних методів. При виконанні роботи застосовувались різноманітні засоби вимірювання температури асинхронного електродвигуна, в тому числі і використання тепловізора для попереднього формування температурної моделі режимів роботи асинхронного електродвигуна.

Практичне значення отриманих результатів полягає в одержанні дієвого методу для проведення визначення технічного стану асинхронного електродвигуна.

1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА СПОСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

1.1 Аналіз основних видів пошкодження асинхронних електричних двигунів

Асинхронні електроприводи складають близько 95% від загальної кількості електроприводів і споживають більше половини електроенергії в галузі [1, 2]. Проте, на підприємствах агропромислового виробництва України щорічно виходять з ладу в середньому від 20 до 25% наявних асинхронних електродвигунів [3, 4], тоді як при випробуваннях на надійність цей показник складає лише 2...3% [5, 6]. Це призводить до непередбачених матеріальних витрат через раптову зупинку технологічних ліній та необхідність ремонту асинхронних двигунів (АД). Основною причиною є недостатній рівень експлуатації цих асинхронних електродвигунів, зокрема, відсутність достатньої інформації про їхній стан і стан механічної частини робочої машини [7, 8]. Виходячи з такої проблематики, однією зі складових підвищення рівня експлуатації як АД, так і робочого обладнання та машин загалом, є своєчасний контроль стану АД.

Як вітчизняний, так і зарубіжний досвід показує, що впровадження сучасних методів діагностики є одним із ключових чинників для виявлення та запобігання відмовам і пошкодженням електрообладнання та систем автоматизованого електроприводу в промисловості. [9]. Такий підхід дозволяє підтримувати експлуатаційні параметри у визначених межах і передбачати стан АД [10].

Різні методи діагностики сприяють збільшенню економічної ефективності експлуатації АД у промисловості та агропромислового виробництві (АПВ).

Сьогодні АД являється головними споживачами електричної енергії в Україні та широко застосовуються в електропривідних системах промисловості та ін. Проте протягом їх роботи виникає значна кількість відмов через аварійні ситуації, що щорічно складає від 20 до 25% від загальної кількості працюючих АД [11, 12].

Пошкодження АД спричиняє збитків підприємствам, де вони встановлені. Ця ситуація спричиняє простої обладнання або виробництва продукції за рахунок аварій двигунів. Зменшення рівня прямих і непрямих витрат під час експлуатації АД нашоухує користувачів двигунів на необхідність у підвищенні якості їх діагностики та надійності, що є успіхом для всіх галузей виробництва

Основними видами пошкоджень у серійному виробництві є [9]:

- різноманітні кінематичні похибки у виготовленні елементів;
- вихід параметрів за межі заявлених норм точності;
- недоліки складання (включаючи ексцентриситет, перекося, несумісність зазорів, відносний зсув взаємодіючих компонентів тощо);

На протязі всього часу експлуатації, через природне старіння елементів у процесі використання, відбувається зміна параметрів АД, що може призвести до їх ушкодження або навіть поломки.

На рисунку 1.1 розглянуті ушкодження та поломки головних вузлів АД:



Рисунок 1.1 – Графік розподілу ймовірності поломок основних вузлів асинхронного електродвигуна

Розрізняють внутрішні та зовнішні причини несправності електродвигуна.

Виокремлені внутрішні та зовнішні фактори, що спричиняють несправність АД. Внутрішні так і зовнішні несправності класифікуються на механічні та електричні.

1.2 Дослідження пошкоджень АД отриманих під час виробництва та експлуатації АД

Дослідження ушкоджень під час виробництва та роботи АД показало, що пошкоджуються ті елементи, які підлягають електричному та механічному навантаженню (рис. 1.2)



Рисунок 1.2 – Діаграма розподілу пошкоджень асинхронних двигунів

Наприклад, дефекти в підшипниках можуть бути умовно класифіковані, як локальні, так і розподілені. Розподілені ушкодження визначаються хвилястістю, шорсткістю поверхні і без змін у елементах кочення. Локалізовані дефекти, з іншого боку, проявляються у вигляді відскоків, ямок та тріщини по поверхні підшипника кочення, що спричиняє серію ударних вібраційних коливань

Характерні частоти для доріжок кочення, кульок або роликів використовуються за розмірами підшипників та швидкістю обертання машини, а стан підшипників оцінюється через аналіз частот та з використанням методу механічного вібраційного аналізу.

Одними з найнебезпечніших та поширених ушкоджень АД являються пошкодження в обмотці статора, а саме міжвиткове коротке та міжфазове замикання, обрив ланцюга та замикання фази із землею. Такі несправності можуть спричинити серйозні збої в роботі АД, якщо ці дефекти не будуть своєчасно виявлені.

Пошкодження ротора АД можуть бути зумовлені електричними пошкодженнями, такі як обрив стрижня, механічні дефекти або не співвісність ротора.

Перший тип пошкоджень може виникати через термічні напруження на поверхні ротора або перенапруги під час запуску АД можуть призвести до

поломки стрижня, що істотно вплине на крутний момент і створить небезпеку для експлуатації.

Інший тип ушкоджень ротора може бути пов'язаний з нерівномірним повітряним зазором. Цей дефект часто виникає через ряд механічних проблем АД. До цих механічних проблем відносять дисбаланс навантаження або несумісність значення, що змінюється горизонтальним, вертикальним або радіальним зсувом між валом та навантаженням.

За умови відсутності співвісності валу ротор буде переміщатися з свого нормального положення під впливом постійних силових радіальних дій.

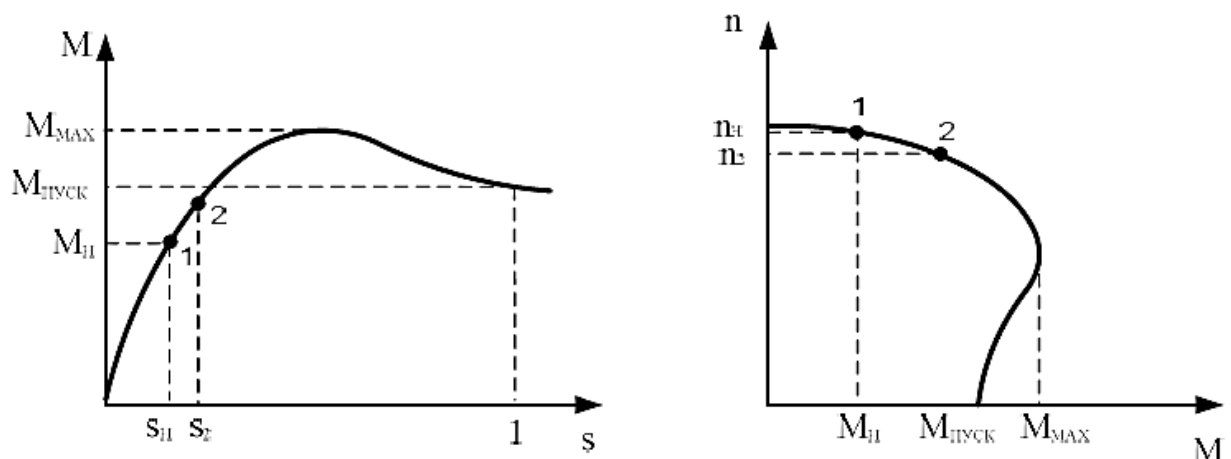
Операційні дефекти поділяються на дві категорії залежно від швидкості їх розвитку:

- швидко прогресуючі дефекти;
- дефекти, що спричиняють раптові відмови.

Головна проблема виникає при діагностуванні швидко прогресуючих дефектів, адже вони є важко прогнозованими. Ці відмови виникають через виробничі технологічні дефекти або через руйнування під впливом навантаження, яке перевищує крайню лінію міцності компонентів. Після ремонту АД, що включає розбирання та заміну деталей, їх надійність часто знижується [8].

1.3 Механічна характеристика електродвигунів

У сучасних АД ковзання знаходиться в межах від 0,02 до 0,06. Залежність частоти обертання від електромагнітного моменту є характеристикою АД, яка використовує його експлуатаційні можливості $n_2 = f(M)$, що називається механічною характеристикою (МХ) (рис. 1.3 б).



а

б

Рисунок 1.3 – Графік механічної характеристика електричного двигуна: а – залежність обертового моменту від ковзання; б – залежність частоти обертання від електромагнітного моменту

За своєю характеристикою вона відрізняється від залежності обертового моменту від ковзання $M = f(S)$, (рис.1.3, а), лише положення відносно координатної системи. Припустимо, що точка 1 на рис. 1.3, вказує на номінальний режим електродвигуна. Момент M_H , що відповідає цьому режиму є номінальним.

Відповідні ковзання s_H та частоту обертання n_H . називають номінальними. При рівномірному обертанні цей момент дорівнює статичному гальмівному моменту опору навантаження. Зі зростанням навантажувального моменту частота зниження обертання збільшується (ковзання збільшується), що спричиняє зростання моменту, який розвиває двигун.

Цей процес завершиться, коли період, що розганяє двигун, зрівняється з моментом навантаження, наприклад, у точці два. Тоді встановиться швидкість обертання $n = n_H 2$ та ковзання $s = s_H 2$.

Здатність автоматично встановлювати рівновагу статичним гальмівним моментом навантаження та обертовим моментом електродвигуна називається саморегулюванням. Саморегулювання, а також і стійка робота АД, ймовірна доти, поки навантажувальний момент не досягне максимуму M_{max}/M_H .

Якщо навантажувальний момент перевищить максимальний момент двигуна, динамічна рівновага не зможе відновитись, і двигун зупиниться. Співвідношення M_{max} до M_H називається здатністю АД до перевантаження. В звичайних умовах роботи електричних двигунів дана величина знаходиться в межах від 1,8 до 2,5.

Можливості двигуна, які можна застосувати для його робочих характеристик, таких як залежності n_1 , s , M , I_1 , $\cos \varphi_1$, η , від потужності P_2 на валу двигуна при постійних значеннях U та f (рис. 1.4). Ці криві отримують

шляхом вимірювання необхідних величин при різних навантаженнях електродвигуна, а також у режимі роботи двигуна під час холостого ходу.

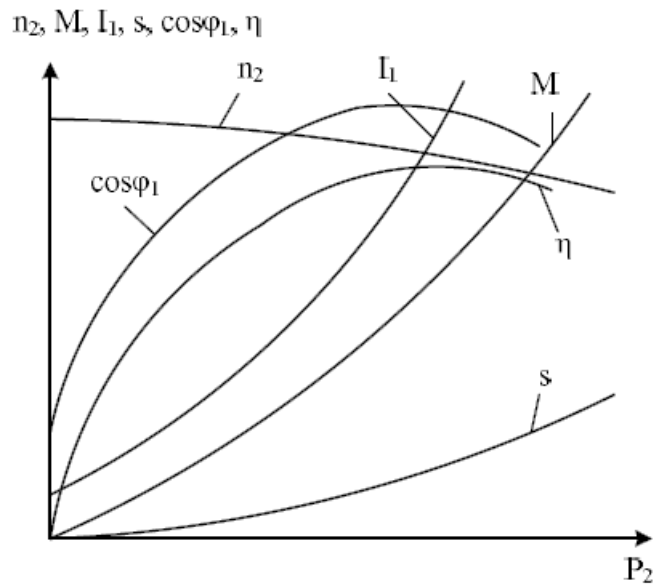


Рисунок 1.4 – Робочі характеристики АД

Розглянемо, як зміняться ці залежності при підвищенні навантаження на двигун. Однією з таких характеристик є обертовий момент: $M = f(P_2)$.

Відомо, що:

$$M = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{P_2 \cdot 60}{2\pi n_2} \quad (1.1)$$

де ω_2 – кутова темп обертання ротора.

Оскільки зі збільшенням потужності P_2 (зростанням гальмівного моменту) періодичність обертання ротора поступово зменшується, залежність $M = f(P_2)$ має певні відмінності від лінійної. Вказанні залежності також пояснюють наступні характеристики $n_2 = f(P_2)$ і $s = f(P_2)$.

У стані холостого ходу ротора $P_2 = 0$, і струм статора дорівнює струму холостого ходу ($I_1 = I_{1x}$), який, може варіюватись та буде становити 40...60 % від номінального значення I_{1x} . Зі зростанням навантаження збільшується струм I_2 у роторному колі, що призводить до відповідного зростання струму I_1 в обмотці статора.

Характеристика $\cos \varphi I = (P_2)$ показує, як зі що із зростанням навантаження міняється відношення P_1 , яку двигун отримує з мережі, до повної потужності S_1 , що також враховує реактивну потужність Q_1 , потрібну для формування обертового магнітного поля $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$. В режимі холостого ходу АД споживає відносно високу реактивну потужність Q_1 , тоді активна потужність несе втрати лише на компенсацію втрат у двигуні.

Тому, $\cos \varphi_1$ в стані холостого ходу є низьким (зазвичай в межах 0,15...0,2).

При підвищенні навантаження потужність P_1 зростає, тоді як реактивна потужність Q_1 змінюється незначно. ККД двигуна визначається як відношення корисної потужності P_2 до робочої потужності P_1 , яку АД отримує з мережі $\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$.

Потужність P_1 є сумою корисної потужності P_2 та потужності усіх втрат у АД. Втрати можна поділити на постійні, а саме втрати на гістериз та вихрові струми в статорі, які практично не залежать від навантаження, а також втрати змінні (нагрів провідників обмоток ротора та статора), які залежать від навантаження. Максимальний ККД досягається, коли постійні втрати дорівнюють змінним.

1.4 Існуючі методи діагностики АД

Гостро постає проблема в необхідності діагностики стану АД під час їх роботи. Раннє виявлення дефектів у працюючому ЕД дозволить запобігти раптовій зупинці виробництва через аварію, зменшити видатки на ремонт, обслуговування та продовжити термін служби обладнання.

Методи діагностики АД, які аналізуються і розглядаються, являються результативними та наразі використовуються.

Способи діагностики, які ґрунтуються на:

- дослідженні вібрацій окремих компонентів АД;
- дослідженні акустичних коливань, що виникають під час роботи двигуна;
- вимірюванні і аналізі температурних показників окремих елементів АД;
- аналізу вузлів механічних, зокрема підшипників;

- дослідженню електричних параметрів АД;
- перевірка ізоляції та інших аспектів.

Сучасний метод діагностики АД повинен відповідати таким вимогам:

- забезпечувати високу точність діагностики пошкоджень АД
- виявляти можливість діагностики частково або усіх електричних та механічних ушкоджень АД і супутніх механічних пристроїв;
- дозволяти проводити дистанційне вимірювання пошкоджень АД, що надважливо, коли немає доступу до обладнання;
- бути малозатратним у виконанні та простим у проведенні вимірювань;
- забезпечувати швидку аналітичну вимірювань за допомогою обчислювального та програмного забезпечення.

Сучасні методи діагностики АД можливо розділити на дві групи.

До першої групи, необхідно віднести способи тестової діагностики, до яких входить вимірювання опору ізоляції, внутрішнього опору обмоток, струмів витоків, діелектричні втрати та інші.

Пробне діагностування – це метод виявлення дефектів АД під час проведення ТО та ремонту відповідно до інструкції. Цей вид діагностування має чітку структуру і допомагає не лише запобігти різного виду дефектів, але й виникненні можливості їх появи.

АД підлягає випробуванням з підвищеними значеннями напруги, а це може призвести до негативного впливу на ізоляцію, а також можуть виникати мікродефекти в обмотці, які з часом розвиваються під впливом частих перевантажень, зупинок, пуску, а також неякісної електроенергії. Високовольтне випробування, під час планово-попереджувальних ремонтів, призводить до збільшення кількості дефектів, що насамперед може призвести до аварійного виходу АД з ладу. Кожен процес збирання та розбирання АД також сприяє збільшенню цих мікродефектів.

Тимчасове зупинення роботи АД, неможливість захисного вимкнення двигуна, а також відсутність контролю при ненормальних режимах являється суттєвими недоліками тестового діагностування АД.

Для переходу, за регламентом, до ремонту та обслуговування за фактичним станом може знадобитись детальна діагностика двигуна. Щоб ґрунтовно підготуватись до ремонту АД, необхідно знайти у двигуні всі дефекти, які можуть вплинути на час роботи АД, ще до його повної відмови

З наведено вище можна сказати, що важливо використовувати методи діагностування, які не тільки відносяться до функціональних, але й дозволяють виявити дефекти конкретних частин електрообладнання. Крім того, функціональні методи діагностики є економічно вигіднішими, оскільки не потребують тимчасового виведення АД з експлуатації [13].

На даному етапі застосовуються системи багатофункціональної діагностики ізоляції, що використовують високовольтне імпульсне випробування [13-15].

Отже, ці способи діагностування можуть не повністю визначити пошкодження АД та їх застосування можливе лише при первинному огляді та діагностуванні АД.

1.5 Процес штучного навантаження АД

Поточні значення ККД та втрат активної потужності на вузлах двигуна можна визначити тільки за умов його навантаження.

При реальному навантаженні двигуна, тобто під час взаємодії з певною робочою машиною, це дуже складно виконати. Тому, необхідно розглядати процес штучного навантаження АД. Під визначенням поняття штучне навантаження АД необхідно розуміти, що це послідовність технологічних операцій, спрямованих на навантаження АД різними способами та визначення його ККД при номінальній напрузі на затискачах та номінальній потужності на валу двигуна.

Це можна здійснити різними методами (рис. 1.5). [8].



Рисунок 1.5 – Методи здійснення процесу штучного навантаження АД

1.5.1 Методи прямого (безпосереднього) та непрямого визначення втрат і ККД

Для розгляду безпосереднього (прямого) та непрямого визначення втрат і ККД в АД необхідно визначити, які ж втрати відбуваються в АД та від чого вони залежать. На рисунку 1.6. наведено втрати, які відбуваються в основних вузлах АД.



Рисунок 1.6 – Діагностичні параметри АД

Втрати в асинхронному електричному двигуні поділяються на кілька основних видів:

1. Активні втрати. Втрати на опір обмотки статора відбуваються через протікання струму, що призводить до нагрівання.

2. Втрати в обмотці ротора. Втрати на опір обмотки ротора, такі, як втрати в статорі.

3. Втрати в магнітопроводі (магнітні втрати):

- втрати на гістерезис: виникають через перемагнічування матеріалу магнітопроводу;

- вихрові втрати: спричинені утворенням вихрових струмів у магнітопроводі.

4. Механічні втрати:

- втрати на тертя: в підшипниках, у вентиляторі для охолодження двигуна тощо;

- втрати на вентиляцію: енергія, витрачена на охолодження двигуна.

5. Втрати на паразитні струми. Виникають через протікання невеликих струмів у різних частинах двигуна, які не беруть участь у корисній роботі.

6. Втрати на додаткові втрати. Включають додаткові втрати, що виникають через неоднорідність розподілу струму та магнітного потоку, а також через несиметрію конструкції та інші фактори.

1.5.2 Методи безпосередньої (прямої) оцінки втрат та ефективності (ККД)

Для безпосереднього визначення втрат та ККД використовуються наступні методи [8]:

1. *Метод вимірювання електричної потужності* — це спосіб визначення втрат і ефективності в електричних системах через оцінку вхідної та вихідної електричної потужності. Його суть полягає у вимірюванні потужності, яка подається на пристрій або систему, і потужності, яка виходить після роботи пристрою. Це дозволяє оцінити втрати енергії та розрахувати ККД.

Під час випробувань двигуна ККД визначають, як відношення суми потужності, переданої еталонній машині, та втрат у ній до потужності, що подається на випробувану машину. Під час тестування генератора ККД

визначається як співвідношення між потужністю, відданою випробуваною машиною, та різницею між потужністю, поданою на еталонну машину, і втратами в ній. У всіх наведених методах прямого визначення ККД його обчислюють за формулою. [8]:

$$\eta = \left(P_2 / P_1 \right) \cdot 100, \quad (1.2)$$

де P_1 і P_2 – відповідно потужність, що подається і потужність, що передається.

2. *Метод гальмування* використовується в основному для визначення ККД електричного двигуна. Гальмування виконується за допомогою механічного або іншого гальма з вимірюванням моменту. Потужність на валу (іноді називається механічною потужністю) визначається як кількість механічної енергії, що передається через вал двигуна або машини за одиницю часу. Вона залежить від крутного моменту, що діє на вал, і швидкості обертання вала.

3. *Метод навантаження* застосовується для двигунів і генераторів. Метод полягає в створенні контрольованого навантаження на АД. Це може бути електричне навантаження (для електричних машин) або механічне. Під час навантаження здійснюється вимірювання, такі показників, як струм, напруга, температура, деформація, напруга тощо. Це дозволяє вивчати поведінку системи. Зібрані дані аналізуються для визначення ефективності системи, виявлення можливих проблем і оптимізації її роботи. У процесі випробувань вимірюють електричну активну потужність, що надходить до двигуна, $P_{1д}$, та електричну активну потужність, яку віддає тарований генератор, $P_{2г}$. ККД електричного двигуна, що досліджується, $P_{1д}$ встановлюється з врахуванням ККД тарованого генератора, $P_{2г}$ у такий спосіб:

$$\Delta P = \frac{P_{1д} - P_{2г}}{2} \quad (1.3)$$

1.5.3 Методи опосередкованого (непрямого) знаходження втрат і ККД

Метод опосередкованого (непрямого) знаходження втрат і ККД, також відомий, як метод окремих втрат, базується на визначенні кожного виду втрат окремо, як експериментальним, так і розрахунковим шляхом [8]. Потім втрати підсумовуються, а ККД розраховується за формулою:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1}\right) \cdot 100 = \left[1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_2 + P_{\Sigma}}\right] \cdot 100 \quad (1.4)$$

де P_{Σ} – сумарне значення втрат.

Відомі такі методи непрямого визначення втрат і ККД.

Метод взаємного навантаження — це техніка, що використовується для оцінки характеристик електричних машин, зокрема АД, шляхом взаємодії кількох машин або систем під навантаженням. Цей метод дозволяє вивчати вплив одного електродвигуна на інший, а також їхні взаємні ефекти в роботі. Ось кілька ключових аспектів цього методу.

Тоді, загальна сума втрат в одному АД можуть бути визначені за формулою

$$P_{\Sigma} = \frac{P_1 - P_2}{2} \quad (1.5)$$

Метод динамометра або тарованого двигуна — це один із способів вимірювання механічної потужності двигунів. Цей метод полягає в використанні динамометра (приладу, що вимірює силу або момент) для оцінки потужності, яку виробляє двигун.

Динамометр або тарований двигун підключається до виходу електричного двигуна, що досліджується. Коли двигун працює, динамометр вимірює момент, який він передає на навантаження. Метод дозволяє враховувати втрати потужності в двигуні, оскільки динамометр вимірює фактичну механічну потужність, що передається на навантаження. Тарований двигун може використовуватися для калібрування системи, що дозволяє точно вимірювати потужність. Він може бути встановлений у системі як еталон для порівняння. Динамометри забезпечують точні вимірювання механічної потужності, що є критично важливим для оцінки ефективності електричних машин, а також метод

можна застосовувати до різних типів електричних двигунів, а також до інших механічних систем.

Метод розділення втрат потужності дозволяє детально вивчити різні компоненти втрат потужності, щоб краще зрозуміти їх вплив на загальну ефективність роботи АД.

Втрати потужності в АД можна розділити на кілька категорій:

- Втрати на термічне (теплове) випромінювання (втрати в обмотках, статорі і роторі);
- Механічні втрати (втрати в підшипниках, тертя);
- Втрати внаслідок магнітних явищ (гистерезисні та вихрові втрати в магнітному матеріалі).

1.6 Визначення теплового режиму АД

Найбільша кількість відмов АД пов'язана з виходом з ладу ізоляції через перевищення допустимих теплових норм, вплив механічних зусиль (тиск, вібрація, удари), вологи, агресивного середовища та інших факторів. Однією з головних причин несправностей для машин постійного і змінного струму є порушення їх теплового режиму (робота з недостатнім охолодженням або без нього).

Зважаючи на те, що АД струму працюють в умовах значних навантажень, а також на те, що системи охолодження двигунів аналогічні, можна зробити висновок, що ізоляція в АД буде схильна до передчасного старіння. Температура електричного двигуна впливає на ізоляцію обмоток, роботу підшипників та інші елементи електродвигуна, що є активними. Гранично допустимі температури активних частин є одним із найважливіших факторів, що обмежують потужність АД і значно впливають на підвищення надійності, ресурсу та величину граничної одиничної потужності.

Отже, тепловий стан є одним із ключових факторів, що впливає на термін служби ізоляції обмоток АД. Тому важливо постійно контролювати температуру

вузлів електродвигуна під час випробувань у випадку взаємного навантаження. Використання тепловізора у випробуваннях АД є важливим для ефективного моніторингу і оцінки теплового стану двигуна. Тепловізор дозволяє здійснювати безконтактний контроль температури різних частин двигуна, що надає кілька ключових переваг:

- тепловізор допомагає виявити ділянки з підвищеною температурою, які можуть свідчити про перегрів або неефективну тепловіддачу. Це може допомогти у виявленні проблем, таких як несправності в ізоляції, перегрів обмоток або контактів;

- завдяки тепловізору можна спостерігати, як температура розподіляється по різних частинах електричного двигуна під час випробування. Це дозволяє оцінити ефективність охолодження та виявити потенційні проблеми з конструкцією або вентиляцією;

- тепловізор дозволяє відстежувати зміни температури в реальному часі, що важливо для аналізу динаміки температурних змін під час різних режимів роботи електричного двигуна, включаючи його нагрівання та охолодження;

- знання температурного профілю допомагає в оцінці енергетичної ефективності електричного двигуна та визначенні потенційних втрат енергії, що може бути корисним для оптимізації роботи електричного двигуна та зниження витрат на енергію.

В магістерській роботі було використано тепловізор марки UNI-T PRO UT1165A.



Рисунок 1.7 – Тепловізор UNI-T PRO UTI165A

Тепловізор UNI-T PRO UTI165A – це професійний тепловізор, який забезпечує високу точність і широкий спектр функцій для термографічного аналізу [16].

Даний тепловізор – це портативний тепловізор, який дозволяє детально вивчати температурні профілі і виявляти теплові аномалії за допомогою інфрачервоної термографії. Цей прилад ідеально підходить для використання в промислових і будівельних додатках, а також для забезпечення технічного сервісу електричних і механічних систем.

Основними характеристиками запропонованого тепловізора є:

- роздільна здатність матриці – 160×120 пікселів;
- дисплей – 3.2-дюймовий кольоровий LCD;
- чутливість (NETD): $< 0,08^{\circ}\text{C}$;
- висока чутливість до температурних змін, що дозволяє виявляти навіть незначні зміни температури.

Температурний діапазон:

- максимальна температура – до 400°C ;
- мінімальна температура – залежить від специфікації, але зазвичай починається з -10°C ;
- точність вимірювання – $\pm 2^{\circ}\text{C}$ або $\pm 2\%$ від показання;
- забезпечує високу точність при вимірюванні температури;
- оптичне співвідношення – 8:1.

Застосовується для перевірки електричних з'єднань, трансформаторів, розподільчих коробок на наявність перегрівів, перевірки стану обладнання, виявлення перегріву у механічних системах.

Тепловізор UTI165A є потужним інструментом для професійного термографічного аналізу, що забезпечує точність і надійність у вимірюваннях температури.

Висновок до розділу

Необхідною умовою визначення стану електричного асинхронного електричного двигуна є попередження поломок, що призводять до дороговартісних ремонтів. При цьому слід зазначити, що основною особливістю штучного навантаження виникає потреба у дослідженні кількох методів одночасно. Так додатковою умовою для визначення стану електричних асинхронних двигунів можна застосовувати тепловізори, що дозволяють додатково надати інформацію по основних місцях їх перегріву.

2 МЕТОДИКА ТА ЗАСОБИ ВИПРОБУВАНЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1 Методика визначення теплових характеристик асинхронних електродвигунів

Залежно від технічних характеристик і режиму експлуатації, допустима температура нагрівання АД під час роботи переважно визначається температурною стійкістю використаних ізоляційних матеріалів. У сучасних АД використовуються різні типи ізоляції з такими нормативними (допустимими) температурами:

- для класу *A* – до 105 °С;
- для класу *E* – до 120 °С;
- для класу *B* – до 130 °С;
- для класу *F* – до 155 °С;
- для класу *H* – до 180 °С;
- для класу *C* – більше 180 °С.

Найбільш поширеними є класи *B*, *F* та *H*. Дотримання обмежень по допустимій температурі гарантує, що АД зможе функціонувати протягом 15-20 років. Перевищення цієї температури призводить до передчасного руйнування ізоляції та скорочення терміну служби двигуна. Наприклад, для двигунів з класом ізоляції *A* перевищення допустимої температури на 8-10 °С може удвічі зменшити термін служби.

Процедура перевірки АД за умовами нагрівання полягає в порівнянні максимально допустимої температури з реальною температурою, яку двигун має (або буде мати) під час роботи при відповідному навантаженні. Зазвичай оцінюється не абсолютна температура, а так званий перегрів τ , що визначається як різниця між температурою двигуна T_d і температурою навколишнього середовища T_{oc} :

$$\tau = T_d - T_{oc} \quad (2.1)$$

де T_d – величина температури електричного двигуна, °С;

T_{oc} – величина температури навколишнього середовища, °С.

Так, при виконанні теплових розрахунків АД стандартною температурою оточуючого середовища, прийнятою для розрахунків, є $T_{oc} = 40^{\circ}\text{C}$. Це означає, що номінальна потужність двигуна, зазначена в паспорті, відповідає умовам роботи при температурі навколишнього середовища, яка не перевищує цього значення. Якщо температура середовища відрізняється від стандартної, то може виникнути необхідність у коригуванні теплового навантаження на двигун або зміні умов його експлуатації.

Для температури оточуючого середовища, вищої за 40°C , електричний двигун може потребувати зниження потужності або додаткового охолодження, щоб уникнути перегріву і скорочення терміну служби.

Зниження T_{oc} порівняно зі стандартною дозволяє на певний час навантажити АД трохи більше його номінальної потужності. Однак при підвищеній температурі навантаження на двигун слід зменшити. Враховуючи перегрів, слід зазначити, що електродвигун працюватиме в допустимому тепловому режимі за умови:

$$\tau_{max} \leq \tau_{доп} \quad (2.2)$$

де $\tau_{доп}$ – допустимий рівень перегріву електричного двигуна, який визначається класом його ізоляції;

τ_{max} – максимальний перегрів при експлуатації електродвигуна під відповідним навантаженням.

Прямий метод контролю за перегрівом згідно з умовою (2.2) передбачає побудову графіка температурного підвищення протягом робочого циклу електричного двигуна для визначення τ_{max} .

Точний аналіз теплових процесів в АД неможливий, оскільки він складається з різних деталей, виготовлених із матеріалів, що мають різні теплоємності та теплопровідність. Крім того, умови нагрівання окремих частин двигуна різняться, а напрямки теплових потоків залежать від режиму роботи.

Тому для створення математичної моделі теплових процесів в АД приймаються такі припущення:

- АД розглядається як однорідне тіло з нескінченно високою теплопровідністю і однаковою температурою у всіх точках;
- тепловіддача в навколишнє середовище пропорційна першому степеню різниці температур АД та середовища;
- навколишнє середовище має нескінченно велику теплоємність, тобто коефіцієнт тепловіддачі не залежить від температури АД.

Часова стала нагріву АД. Враховуючи прийняті припущення, зміна перегріву АД в часі визначається наступним чином:

$$\tau = (\tau_{\text{поч}} - \tau_y) e^{-\frac{t}{T_n}} + \tau_y \quad (2.3)$$

де $\tau_y = \frac{\Delta P}{A}$ – усталене підвищення температури двигуна, °С;

$T_n = \frac{C}{A}$ – часова стала нагрівання двигуна, с;

ΔP – втрати потужності у двигуні, Вт;

A – тепловіддача АД – обсяг тепла, який двигун передає в навколишнє середовище за 1 с при різниці температур між двигуном та середовищем в 1°С, вимірюється в Дж/(с·°С);

C – теплоємність АД – кількість тепла, необхідна для підвищення температури двигуна на 1°С, вимірюється в Дж/°С.

Фізичний зміст сталої нагрівання T_n полягає в тому, що вона дорівнює часу, необхідному для нагрівання АД до стабільного перегріву τ_n за умови, що тепловідведення в навколишнє середовище відсутнє.

Вираз (2.3) можна використовувати для розрахунку зміни перегріву АД, як під час його нагрівання, так і охолодження. Для цього достатньо підставити у (2.3) відповідні значення, а також сталу часу.

Оскільки стала часу T_n , яка характеризує процес зміни температури, обернено пропорційна тепловіддачі двигуна, слід зазначити, що процеси нагрівання та охолодження АД можуть мати різні сталі часу. Кількісно

погіршення тепловідведення визначається коефіцієнтом погіршення тепловідведення при нерухомому роторі:

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A} \quad (2.4)$$

де A_0 і A – це тепловіддача за умов нерухомого ротора при номінальній швидкості обертання.

Наближені значення коефіцієнта β_0 для АД:

- з автономною вентиляцією – 1;
- без примусової вентиляції – 0,95...0,98;
- самовентильовані – 0,45...0,55;
- захищені самовентильовані – 0,25...0,35.

Сталу часу охолодження АД можна визначити з урахуванням (2.4) за умови нерухомого електродвигуна:

$$T_0 = \frac{T_n}{\beta_0} \quad (2.5)$$

Оскільки $\beta_0 \leq 1$, то $T_0 \geq T_n$, тобто охолодження нерухомого АД проходить повільніше, аніж його нагрівання. На рисунку 2.1 наведено криві нагрівання АД для різних $\tau_{\text{поч}}$ та ΔP .

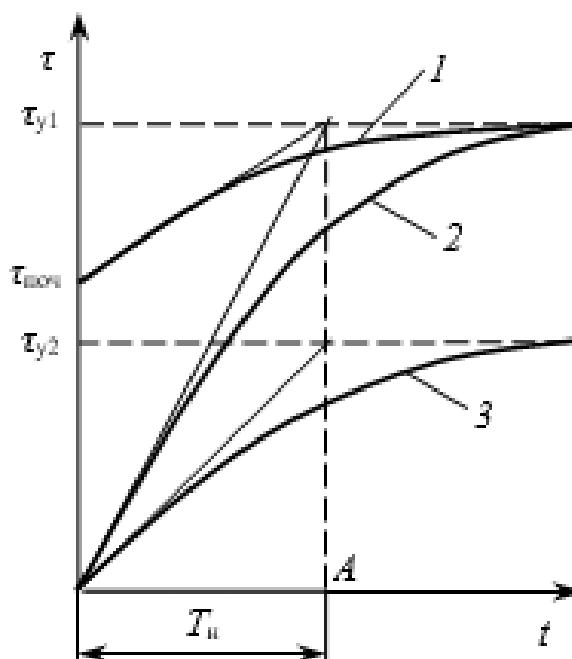


Рисунок 2.1 – Крива нагрівання АД

При прийнятих раніше припущеннях нагрівання АД відбувається за експоненціальним законом і характеризується сталою часу T_n . Вищим втратам (криві 1, 2) відповідає і більше значення стабільного перегріву.

Отже, час досягнення стабільного значення перегріву залежить від сталої часу нагрівання АД. Оскільки теплоємність АД пропорційна його об'єму, а тепловіддача – площі поверхні, двигуни більшої потужності, які мають більші розміри, зазвичай мають і більшу сталу часу нагрівання.

Охолоджувальний процес двигунів відбувається зі зниженням перегріву за кривою 1 (рис. 2.2) під час зменшення навантаження, а також за кривими 2 та 3 при відключенні електричного двигуна від мережі. Процес охолодження АД характеризується сталою часу T_0 .

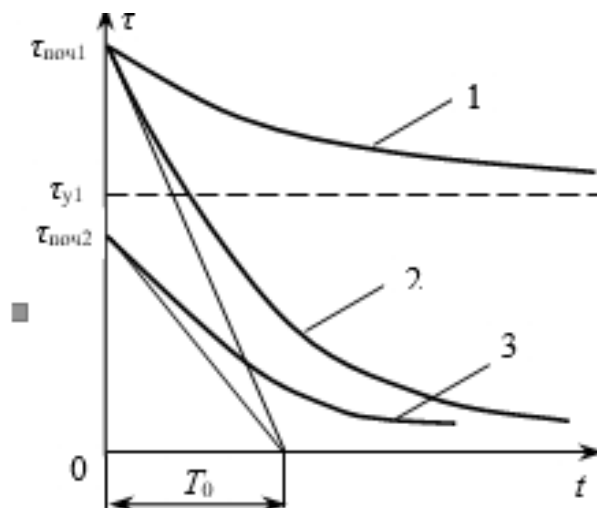


Рисунок 2.2 – Криві $\tau = f(\tau)$ охолодження двигуна

З побудованої таким чином кривої перегріву $\tau(t)$ визначається його максимальне значення та перевіряється виконання умови (2.2).

Необхідно зазначити що існують умови та недоліки перевірки непрямыми методами, отже розглянемо їх. Недоліком прямого методу перевірки АД за умовами нагрівання, розглянутого в попередньому розділі, є те, що він вимагає знання теплових параметрів електричних двигунів – тепловіддачі A та теплоємності C . Оскільки ця інформація зазвичай відсутня в каталогах, використання цього методу стає досить складним. У більшості випадків перевірку

двигунів за умовами нагрівання виконують непрямими методами, які не потребують побудови графіка кривої перегріву $\tau(t)$. До таких методів належать способи еквівалентних величин та середніх втрат.

2.2 Особливості випробувальної схеми АД

В магістерській роботі використовувався метод непрямого взаємного навантаження АД. Перевагами цього методу є його економічність, оскільки один двигун працює в режимі генератора, частина споживаної енергії повертається в систему, зменшуючи енергоспоживання. Метод дозволяє тестувати АД різної потужності і в різних режимах роботи, в також точність у вимірюваннях – система дозволяє з високою точністю визначати теплові параметри та оцінювати роботу електродвигуна під різним навантаженням.

Станція для випробувань АД методом взаємного навантаження призначена для дослідження теплових характеристик і дозволяє імітувати робочі умови, при яких один двигун навантажує інший. Такий метод випробувань є економічно ефективним і широко застосовується для дослідження теплових процесів в електродвигунах.

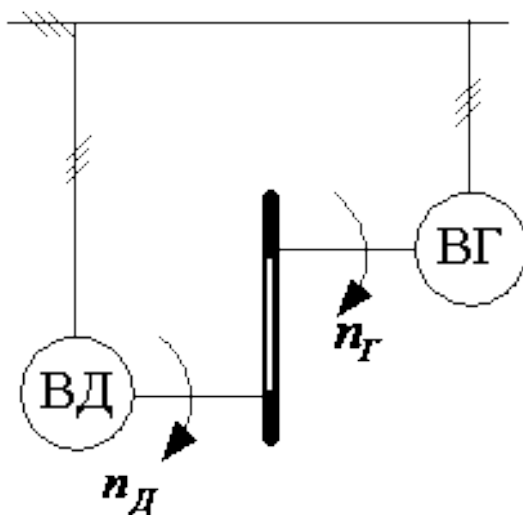


Рисунок 2.3 – Загальна схема випробування АД методом взаємного навантаження

Основні компоненти станції:

1. Два асинхронні двигуни однакової потужності. Один двигун працює в режимі двигуна (робочий АД), а інший – у режимі генератора, передаючи механічне навантаження на перший.

2. Обидва двигуни механічно з'єднані між собою за допомогою передачного механізму.

Перетворювач частоти:

1. Використовується для керування режимом роботи робочого двигуна, дозволяючи змінювати частоту обертання і, відповідно, навантаження. Перетворювач частоти дозволяє точно регулювати швидкість і момент на валу двигуна, що важливо для контролю теплового стану під час випробувань.

2. Також перетворювач забезпечує плавне регулювання параметрів, що дозволяє уникнути різких стрибків навантаження.

Механічне з'єднання двигунів:

1. Двигуни з'єднуються валами через механічні з'єднання. Це дозволяє одному двигуну створювати механічне навантаження для іншого.

2. Важливо забезпечити надійне механічне з'єднання для передачі потужності між двигунами без втрат.

3. Для забезпечення правильного теплового режиму двигунів може використовуватися активна система охолодження (вентилятори або водяне охолодження), щоб підтримувати температуру двигунів на допустимому рівні.

Контрольні та вимірювальні прилади:

1. Термодатчик встановлюються в критичних точках двигуна для моніторингу температури під час випробувань.

2. Амперметри, вольтметри та ватметри використовуються для вимірювання струму, напруги та потужності, споживаної або генерованої двигунами під час роботи.

3. Пристрої для вимірювання крутного моменту і частоти обертання надають інформацію про навантаження на двигун і його робочі характеристики.

Процес випробувань методом штучного навантаження АД для визначення теплових характеристик відбувається наступним чином:

1. АД з'єднуються механічно, підключаються до перетворювача частоти та контрольних приладів. Система охолодження готується до роботи.

Один з двигунів починає працювати як двигун, створюючи механічну потужність, яка передається другому двигуну, що працює в режимі генератора.

Перетворювач частоти дозволяє змінювати режими роботи, поступово збільшуючи або зменшуючи навантаження.

Протягом випробувань система автоматично фіксує всі важливі параметри: температуру в різних частинах двигуна, споживану потужність, крутний момент і швидкість обертання.

За отриманими даними будується графік перегріву двигуна в залежності від часу, що дозволяє визначити час досягнення стаціонарного теплового стану, а також оцінити допустимий режим роботи двигуна без перегріву.

Висновки до розділу

З наведених особливостей проведення експериментальних досліджень необхідно зазначити, що є доволі серйозні проблеми визначення теплових параметрів роботи електричного двигуна. Основним методом визначення теплових характеристик асинхронного електричного двигуна є непрямий метод, який здатен показувати основні недоліки в його роботі та можливий вихід з ладу. Необхідно зазначити, що в компоновці з тепловізійним обладнанням визначення несправностей електродвигуна значно пришвидшується без потреби в його розбиранні та виконанні операцій з пошуку несправностей.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ ТА ОЦІНКА ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Для теплових розрахунків АД при вирішенні комплексних задач нагріву широко використовується метод еквівалентних теплових схем [17-21].

Відповідно до цього методу, машину або її частини поділяють на складові тіла або сегменти, які схожі за матеріалом або характером контакту з сусідніми елементами або середовищем, тобто мають однакові умови тепловіддачі. Чим більше кількість тіл у тепловій системі, тим вища точність розрахунку.

На точність теплового розрахунку впливає не лише кількість тіл, але й, у більшій мірі, точність визначення коефіцієнтів тепловіддачі з поверхонь нагріву, правильне визначення теплопровідності матеріалів та багатьох факторів, що вносять невизначеність у початкові умови. Враховуючи це, зазвичай використовують спрощені теплові схеми заміщення з невеликою кількістю тіл.

Більш точні результати досягаються в тепловій моделі двигуна, де обмотки статора виступають як перше тіло, сталь статора і станина утворюють друге тіло, а ротор асинхронної машини є третім тілом [21]. Еквівалентна теплова схема заміщення асинхронного двигуна, представлена на рисунку 3.1. Дана схема складена саме для такого типу представлення.

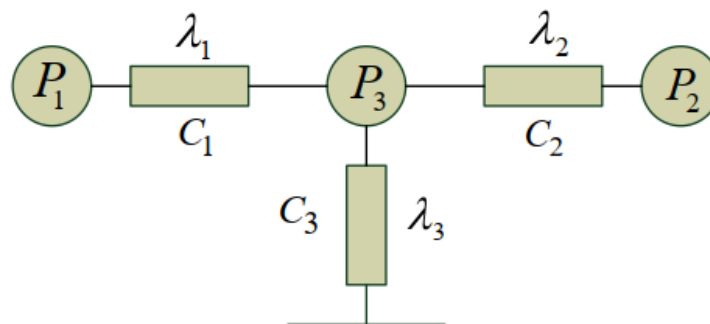


Рисунок 3.1 – Тримасова теплова модель заміщення АД

Сформулюємо систему диференціальних рівнянь, яка буде описувати тепловий режим машини:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} &= \Delta P_1 - \lambda_1 \tau_1 - \lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) - \lambda_{13}(\tau_1 - \tau_3) \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} &= \Delta P_2 - \lambda_2 \tau_2 - \lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) - \lambda_{23}(\tau_3 - \tau_2) \\ C_3 \frac{d\tau_3}{dt} &= \Delta P_3 - \lambda_3 \tau_3 - \lambda_{23}(\tau_3 - \tau_2) - \lambda_{31}(\tau_3 - \tau_1) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де τ_1, τ_2, τ_3 – перевищення температури обмотки статора, ротора та сталі над температурою навколишнього середовища;

$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ – виділена теплова потужність;

C_1, C_2, C_3 – теплоємності тіл;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – теплопровідність обмоток статора, сталі та ротора до навколишнього середовища;

$\lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{23}$ – теплопровідність між тілами.

Магнітні втрати, спричинені явищами гістерезису та вихрових струмів в осерді статора, визначаються згідно з виразом:

$$P_c(I_\mu) = \frac{\xi}{dE(I_\mu)/dI_\mu} (E(I_\mu))^2 \quad (3.2)$$

Для проведення дослідження був обраний асинхронний електричний двигун 4AM90L4У3. Головні параметри досліджуваного АД наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри досліджуваного АД

Параметр	Значення
1	2
Значення номінальної потужності асинхронного електродвигуна P_H , кВт	2,2
Значення номінальної напруги на вході статора U_{1H} , В	220
ККД η_H	0,80

Продовження таблиці 3.1

1	2
Номінальний коефіцієнт потужності, $\cos \varphi_H$	0,83

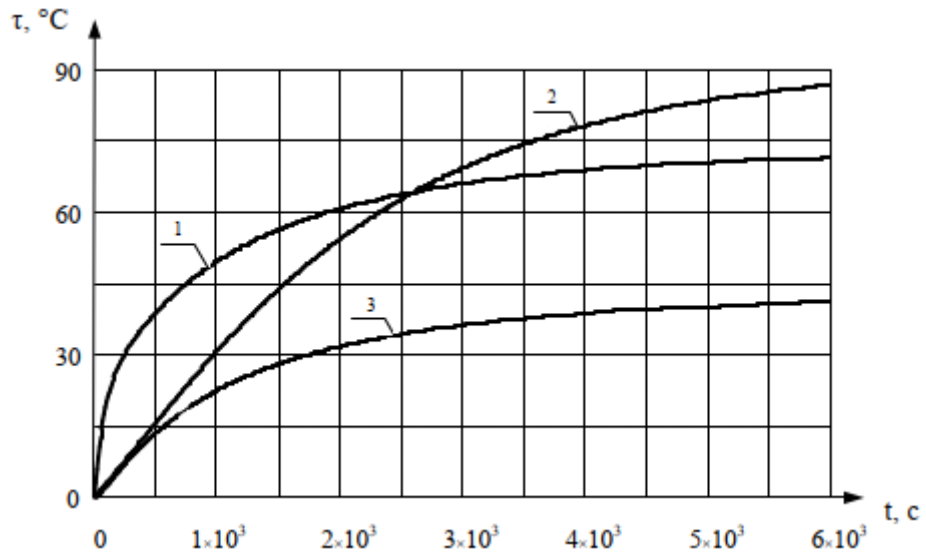
Параметри схеми заміщення для даного електричного двигуна, Ом	$R_1 = 4,15;$ $R_2 = 4,15;$ $x_1 = 3,218;$ $x_2 = 3,218;$ $x_\mu = 92,03.$
Теплопровідність асинхронного електродвигуна, Вт/°С	$\lambda_{13} = 10,5707;$ $\lambda_{23} = 2,7648;$ $\lambda_3 = 13,9969.$
Теплоємності, Дж/°С	$C_1 = 726,1;$ $C_2 = 3260;$ $C_3 = 9623.$

Додатково значення теплоємностей для електричного двигуна введемо наступні значення для математичної моделі: $\varepsilon_n = 1\text{бг/г}$; $V = 10200\text{К}$; $\theta_{1н} = 403\text{К}$.

Проведення дослідження планується провести в порівнянні з номінальним режимом роботи асинхронного електричного двигуна. Отже з цього можна сказати, що першочерговим є отримання кривих нагріву для номінального режиму роботи АД. Наступним кроком є отримання кривих нагріву електродвигуна за умови несиметрії певного значення, що описується величиною ε .

Для проведення експериментальних досліджень було сформовано в додатку А, таблиці А1. До даної таблиці також занесено і отримані результати досліджень відповідно до даних для постановки експерименту.

Виходячи з цього необхідною умовою є розгляд трьох різноманітних тіл за вищеописаними характеристиками. І першочерговим є тримання кривих нагріву для номінального режиму (рисунок 3.2).

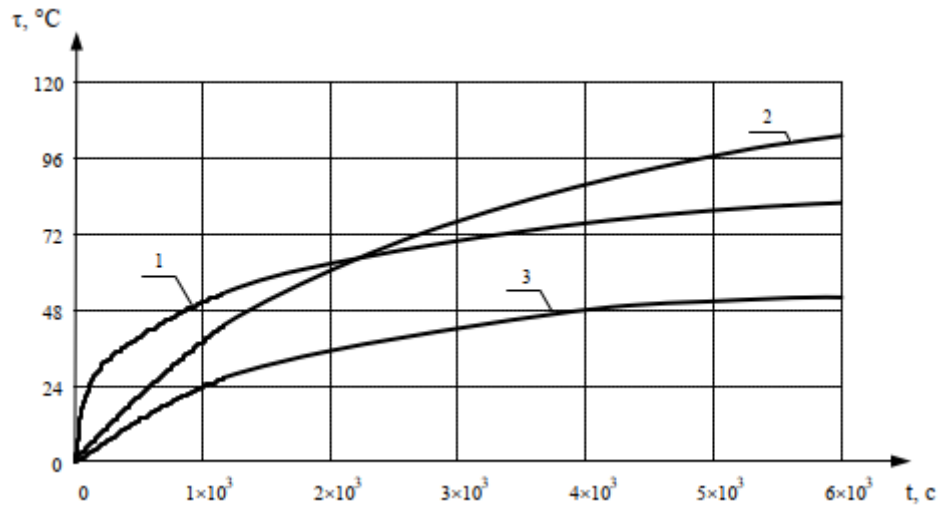


1 – обмотка статора; 2 – корпус та сталь статора; 3 – ротор.

Рисунок 3.2 – Криві нагріву досліджуваного електродвигуна за умови номінального режиму роботи

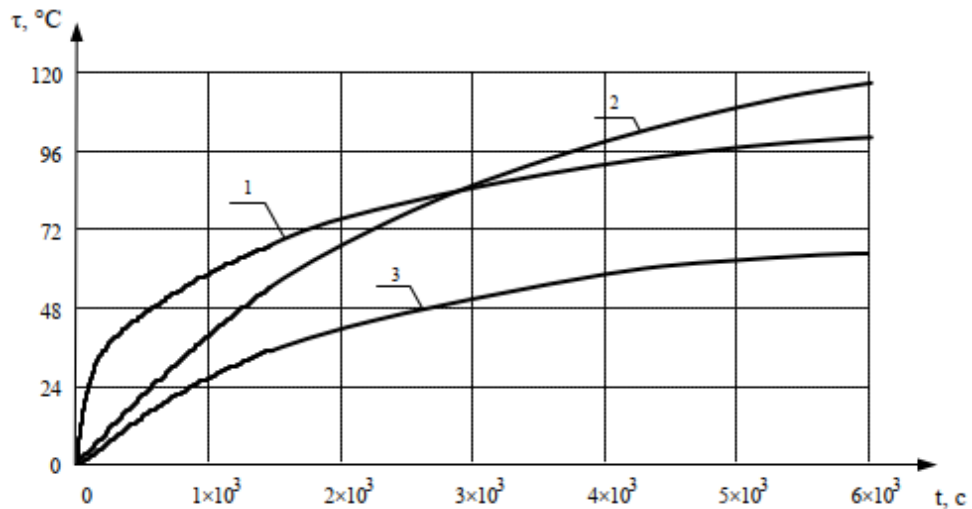
З рисунку 3.2, можна зробити висновок, що досліджуваний АД набирає сталого значення температури через 90 хв роботи в номінальному режимі. Для визначення впливу несиметрії напруги при живленні на перегрів АД пропонується прийняти початково стан нагрітого електродвигуна. Тобто пропонується визначити вплив режимів несиметрії на перегрів двигуна після фактично 90-95 хв його роботи в номінальному режимі.

Дослідження пропонується провести з використанням двох режимів несиметрії напруги живлення $K_{2U} = 0,94\%$ та $K_{2U} = 4,04\%$. В результаті отримано криві нагріву, що характеризують роботу досліджуваного електродвигуна, що наведено на рисунках 3.3 та 3.4.



1 – обмотка статора; 2 – корпус та сталь статора; 3 – ротор.

Рисунок 3.3 – Криві нагріву досліджуваного електродвигуна при несиметрії напруги $K_{2U} = 0,94\%$



1 – обмотка статора; 2 – корпус та сталь статора; 3 – ротор.

Рисунок 3.4 – Криві нагріву досліджуваного електродвигуна при несиметрії напруги $K_{2U} = 4,04\%$

Аналізуючи отримані криві нагрівання при різних режимах несиметрії напруги живлення показує, що швидкості нагрівання різних елементів АД є доволі різними та відрізняються значеннями При цьому необхідно зауважити, що швидкість нагрівання корпусу статора відстає від швидкості нагрівання його обмоток. Хоча необхідно сказати, що подібні закономірності спостерігаються і при роботі АД в номінальному режимі, зміни лише в величині температур та швидкості нагрівання.

При цьому необхідно відзначити, що до нагрівання, найбільш схильні саме статор та його обмотки. Збільшення величини несиметрії спостерігається зменшення швидкості наростання температур всіх елементів асинхронного електродвигуна.

Як зазначалось вище, при використанні тепловізійного обстеження електродвигуна отримуємо наступні зображення, показані на рис. 3.5.

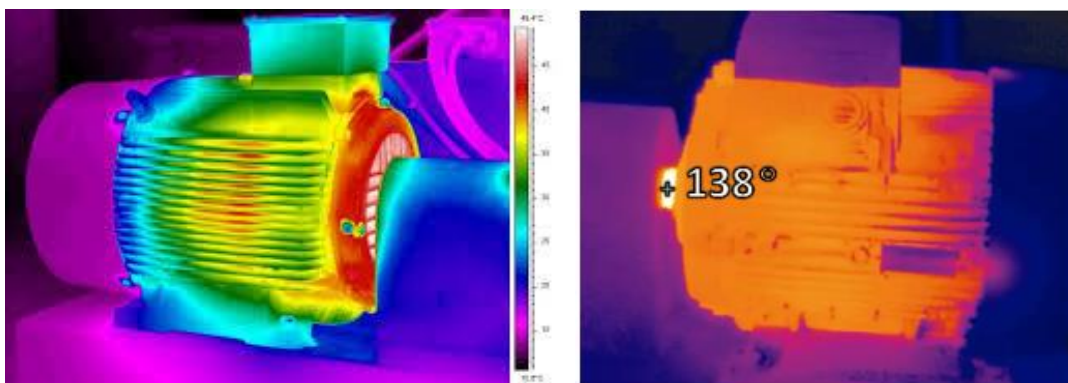


Рисунок 3.5 – Тепловізійне обстеження досліджуваного АД

Необхідно зазначити, що результати тепловізійного обстеження фактично підтверджують отримані результати, та показують саме ті місця, що мають найбільшу величину нагріву. При цьому необхідно зауважити, що тепловізійне обстеження показує вплив інших елементів на процеси нагрівання основних елементів електродвигуна.

Висновок до розділу

Отримані залежності в експериментальних дослідженнях допомагають зрозуміти особливості процесів нагріву основних елементів АД. Необхідно також зазначити, що температура роботи електродвигуна в номінальному режимі без впливу несиметрії напруги має більш крутіші криві з швидкісним перетіканням процесів. За умови несиметрії напруги живлення АД криві є більш плавнішими, що вказує на плавність перетікання процесу, але при цьому температури нагріву є доволі високим порівняно з номінальним режимом роботи.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Як зазначалось в попередніх розділах роботи, основна увага в роботі приділяється питанням технічного обслуговування та ремонту електродвигунів, а саме особливостям визначення пошкоджень без розбирання двигуна.

Подібні роботи проводяться спеціалістами, що мають відповідну освіту та мають всі необхідні допуски до виконання даних робіт.

Оскільки запропонований метод не потребує виконання операцій розбирання електричного асинхронного електродвигуна то відпадає необхідність саме в операціях розбирання двигуна. При цьому необхідно сказати, що для проведення перевірки необхідною умовою є зняття двигуна з обладнання та монтаж його на стенд для проведення дослідження.

Дані операції потребують виконання електромонтажних робіт, що мають певний перелік небезпек. До небезпек, які належать до проведення даного типу робіт відносяться: враження електричним струмом; роботи на висоті; роботи з важким обладнанням; проведення монтажних робіт в складних умовах з рухомими частинами обладнання та машин.

В результаті проведення даних робіт необхідною умовою є кваліфіковане виконання основних операцій та не допущення травмонебезпечних ситуацій та пошкодження електричних двигунів. Виходячи з цього необхідною умовою є забезпечення кваліфікованих фахівців, що виконують роботи всіма необхідними спецодягом, засобами захисту та інструментом.

Необхідно зауважити, що до проведення даних робіт не допускається працівники, що не пройшли інструктаж, не мають відповідної освіти та не придатні до виконання подібних робіт з різних причин. Забороняється також проводити роботи непридатним інструментом та обладнанням.

Всі роботи по демонтажу необхідно проводити за умови повного знеструмлення обладнання та його повної зупинки. При цьому на електричному щиті розміщується табличка з написом «Працюють люди». Подібні таблички розміщуються і в інших місцях де є можливість ввімкнення обладнання та машин з якими проводяться роботи.

Після демонтажу електричного асинхронного електродвигуна необхідною умовою проведення подальших досліджень є проведення очистки його від бруда та інших сторонніх елементів. Дані роботи можуть проводитись різноманітним допоміжним персоналом, який фактично повинен знати будову електричного двигуна та розуміти основні операції з очищення двигунів.

Проведення експериментального дослідження по визначенню пошкоджень електричного асинхронного двигуна потребують операцій по встановленню його на стенд та необхідністю правильного підключення до системи живлення.

При цьому основними небезпеками при проведенні даного випробування є небезпека враження електричним струмом, можливість виникнення пожеж та інші.

Виходячи з такої кількості небезпек та їх особливостей, для проведення даних досліджень також є необхідність забезпечення вищенаведеним обладнанням та іншими засобами. При цьому необхідно зауважити, що додатково виникає можливість виникнення пожеж через можливість значного перегріву АД.

Виходячи з цього обов'язково приміщення повинні забезпечуватись відповідними засобами пожежогасіння. Але проведення дослідження потребує уваги мінімум двох кваліфікованих працівників. При цьому один з них завжди знаходиться біля вимикача для вчасного від'єднання стенда від електричної мережі (знеструмлення). Інший працівник проводить необхідні вимірювання температурного режиму роботи електричного двигуна.

Оскільки тривалість проведення дослідження, як описано вище становить більше 90 хв, то категорично забороняється покидати робоче місце даним працівникам до завершення проведення випробування асинхронного електродвигуна. Після завершення робіт, спостерігають за електродвигуном до моменту пониження температури до безпечного рівня.

Всі наведені вище роботи обов'язково повинні проводитись під керівництвом керівника чи бригадира, який зобов'язаний виконувати різносторонній контроль та нести відповідність за правильність проведення всіх робіт по демонтажу та дослідженні електричних двигунів.

Висновки до розділу

В розділі «Охорона праці» проведено аналіз основних небезпечних факторів впливу на працівників, що працюють з даним електричним та механічним обладнанням. Необхідною умовою є дотримання всіх вимог електробезпеки та охорони праці при проведенні робіт, що зменшать до мінімуму можливість впливу небезпечних факторів на працівників та повністю усунуть можливість виникнення травмонебезпечних чи нещасних випадків на підприємстві.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Основною особливістю проведення випробування електричних двигунів є зменшення часу на проведення технічного обслуговування та подальшого ремонту електрообладнання. Основною причиною зменшення часу є те, що електричний двигун не потрібно розбирати для виявлення пошкодження, а отже справні двигуни, які приходять на проведення технічного обслуговування розбирати не потрібно. Всі ці моменти призводять до економії коштів на проведення діагностування АД.

Необхідно зазначити, що додатково при проведенні ТО виникає можливість завчасного визначення пошкодження АД в результаті тепловізійного дослідження.

Все це в сукупності дає можливість технологічним лініям чи різноманітному обладнанню, яке використовує АД для його приводу зменшити час простоїв на ТО та виконання ремонтів одного з важливих елементів.

Виходячи з вищенаведеного, основний економічний ефект отримуємо виходячи з підвищення ефективності та надійності роботи різноманітного обладнання. А отже пропонується провести визначення економічної ефективності від підвищення рівня надійності асинхронних електродвигунів з використанням запропонованого в роботі методом штучного навантаження.

Для прикладу пропонується обрати необхідність обслуговування АД в кількості 100 шт., що знаходяться в використанні середнього підприємства аграрного сектору. Аналіз АД для агропромислового виробництва обрано через частий вихід їх з ладу через тяжкі умови експлуатації та можливі високі значення несиметрії напруги при їх живленні.

Основні данні для проведення розрахунків зводимо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні дані визначення економічного ефекту від застосування запропонованого методу штучного навантаження

Показники	Значення
Середня кількість АД для діагностики, шт.	100
Ціна ремонту одного АД, грн.	2000
Зменшення кількості відмов, %	30
Зменшення часу діагностування АД, %	25
Витрати робочого часу при визначенні пошкодження запропонованим методом, люд·год	1,7
Економія коштів за умови оптимізація діагностування АД, грн	35
Величина ставки по прибутку, %	30
Величина ставки для податку на майно, %	2,2
Рівень річної амортизації на долю обладнання виходячи з умови 15 річної експлуатації АД	0,05
Вартість системи запропонованого методу діагностики, грн	20 000

Величина чистого прибутку від системи запропонованого методу діагностики АД:

$$\Pi_{\text{ч}} = E_{\text{річ}} - \Delta\Pi_{\text{м}} - \Delta\Pi_{\text{пр}} \quad (5.1)$$

де $E_{\text{річ}}$ – річне значення економії експлуатаційних витрата, грн;

$\Delta\Pi_{\text{м}}$ – величина приросту на майно, грн;

$\Delta\Pi_{\text{пр}}$ – величина приросту значення ставки по прибутку, грн.

$$E_{\text{річ}} = \left(E_{\text{д}}^{\text{кр}} \cdot C_{\text{д}}^{\text{кд}} \right) \frac{1}{n} + Z_e + (E_{\text{бе}} \cdot n) - \Delta\text{АВ} \quad (5.2)$$

де $E_{\text{д}}^{\text{кр}}$ – величина економії коштів за рахунок зменшення числа капітальних ремонтів АД, грн;

$\Delta\text{АВ}$ – величина приросту амортизаційних відрахувань за умови впровадження методу діагностування АД.

$E_{\text{бе}}$ – річне значення економічного ефекту, грн.

$$E_{\text{д}}^{\text{кр}} = e_{\text{д}}^{\text{кр}} \cdot a_{\text{д}}^{\text{кр}} \quad (5.3)$$

$$E_{\text{д}}^{\text{кр}} = 0,33 \cdot 100 = 33 \text{ грн}$$

$$\Delta AB = AB \cdot C_{\text{еу}} \quad (5.4)$$

$$\Delta AB = 0,05 \cdot 20000 = 1000 \text{ грн}$$

$$E_{\text{бе}} = \frac{A_{\text{д}} + P_{\text{д}}}{S} n_{\text{пр.в}} \left(\frac{k_{\text{пр}} - 1}{k_{\text{пр}}} \right) \quad (5.5)$$

$$E_{\text{бе}} = \frac{16045 + 3125}{8} 0,657 \left(\frac{1,175 - 1}{1,175} \right) = 234,5 \text{ грн}$$

$$E_{\text{річ}} = (33 \cdot 2000) \frac{1}{100} + 35 + (234,5 \cdot 100) - 1000 = 23145 \text{ грн}$$

$$\Delta \Pi_{\text{м}} = \Pi_{\text{м}} \frac{C_{\text{еу}} + 0,05 C_{\text{еу}}}{2} \quad (5.6)$$

де $\frac{C_{\text{еу}} + 0,05 C_{\text{еу}}}{2}$ – величина річної балансової вартості першого року при проведенні діагностування запропонованим методом, грн.

$$\Delta \Pi_{\text{м}} = 0,022 \frac{20000 + 0,05 \cdot 20000}{2} = 231 \text{ грн}$$

$$\Delta \Pi_{\text{пр}} = 0,24 (E_{\text{річ}} - \Delta \Pi_{\text{м}}) \quad (5.7)$$

$$\Delta \Pi_{\text{пр}} = 0,24 (23145 - 231) = 5499,4 \text{ грн}$$

$$\Pi_{\text{ч}} = 23145 - 231 - 5499,4 = 17414,6 \text{ грн}$$

Величина економічного ефекту складає:

$$E_p = \frac{\Pi_{ч} - K_{\text{дод}}}{K_p + K_e} \quad (5.8)$$

де $K_{\text{дод}}$ – величина затрат за рік при умові впровадження заходів з реновації, $K_{\text{дод}} = 267$ грн;

K_p – величина коефіцієнт для врахування реновації $K_p = 0,89$;

K_e – величина коефіцієнта, що описує втрати та є нормативним значенням, $K_e = 0,1$;

$$E_p = \frac{17414,6 - 267}{0,89 + 0,1} = 17320,8 \text{грн}$$

Визначаємо термін за який окупляться капіталовкладення з рівняння:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{еу}}}{E_p} \quad (5.9)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{20\,000}{17\,320,8} = 1,2 \text{ роки}$$

Отримані значення для розрахунків зводимо до таблиці 5.2 для подальшого аналізу.

Таблиця 5.2 – Показники ефективності використання запропонованого методу діагностування АД

Показник	Значення
Значення чистого прибутку отриманого в результаті застосування запропонованого методу, грн	17414,6
Величина економії річних витрат, грн	23145,0
Значення величини економічного ефекту, грн	17320,8
Термін за який окупляться капіталовкладення за умови використання запропонованого методу діагностування АД, років	1,2

Висновки до розділу

Отримані данні економічного обґрунтування підтверджують ефективність застосування запропонованої методики діагностування асинхронних двигунів. При цьому слід зазначити, що використання даної методики дозволить окупити капіталовкладення в обладнання за 1,2 роки. При цьому чистий прибуток становитиме 17414,6 грн. Необхідно зазначити, що основним показником все ж таки залишається зменшення часу простоїв технологічного обладнання чи ліній де використовуються АД. Виходячи з наведеного даний метод є доцільним економічно та технічно.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Необхідною умовою визначення стану електричного асинхронного електричного двигуна є попередження поломок, що призводять до дороговартісних ремонтів. При цьому слід зазначити, що основною особливістю штучного навантаження є необхідність використання декількох методів одночасно. Так додатковою умовою для визначення стану електричних асинхронних двигунів можна застосовувати тепловізори, що дозволяють додатково надати інформацію по основних місцях їх перегріву.

2. З наведених особливостей проведених експериментальних досліджень необхідно зазначити, що є доволі серйозні проблеми визначення теплових параметрів роботи електричного двигуна. Основним методом визначення теплових характеристик асинхронного електричного двигуна є непрямий метод, який здатен показувати основні недоліки в його роботі та можливий вихід з ладу. Необхідно зазначити, що в компоновці з тепловізійним обладнанням визначення несправностей електродвигуна значно пришвидшується без потреби в його розбиранні та виконанні операцій з пошуку несправностей.

3. Отримані залежності надають можливість розібратись в особливостях процесів нагріву основних елементів АД. Необхідно також зазначити, що температура роботи електродвигуна в номінальному режимі без впливу несиметрії напруги має більш крутіші криві з швидкісним перетіканням процесів. За умови несиметрії напруги живлення АД криві є більш плавнішими, що свідчить про плавність перетікання процесу, але при цьому температури нагріву є доволі високим порівняно з номінальним режимом роботи.

4. У розділі «Охорона праці» здійснено аналіз ключових небезпечних факторів впливу на працівників, що працюють з даним електричним та механічним обладнанням. Необхідною умовою є дотримання всіх вимог електробезпеки та охорони праці при проведенні робіт, що зменшать до мінімуму можливість впливу небезпечних факторів на працівників та повністю усунуть можливість виникнення травмонебезпечних чи нещасних випадків на підприємстві.

5. Отримані данні економічного обґрунтування підтверджують ефективність застосування запропонованої методики діагностування асинхронних двигунів. При цьому слід зазначити, що використання даної методики дозволить окупити капіталовкладення в обладнання за 1,2 роки. При цьому чистий прибуток становитиме 17414,6 грн. Необхідно зазначити, що основним показником все ж таки залишається зменшення часу простоїв технологічного обладнання чи ліній де використовуються АД. Виходячи з наведеного даний метод є доцільним економічно та технічно.

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. Овчаров В.В. Вовк О.Ю. Теоретичні передумови комплексного діагностування асинхронних електродвигунів. Праці Таврійського державної агротехнічної академії. Мелітополь, 2001. Вип. 1, т. 21. С. 4-6.
3. Вовк О.Ю., Квітка С.О., Квітка О.С. Експлуатаційний контроль функціонального стану осердя та механічної системи асинхронних двигунів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2017. Вип. 7, т. 1. С. 85-93.
4. 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.
5. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Квітка О.С. Дослідження втрат активної потужності в асинхронному двигуні. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2017. Вип. 7, т. 1. С.126-134.
6. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Квітка О.С. Теплова модель асинхронного двигуна в стаціонарних режимах. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки. Харків, 2015. Вип. 164: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 118-120.
7. Вовк О.Ю., Квітка С.О. Технологія періодичного контролю роботоздатності асинхронних двигунів. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2011. Вип. 11, т. 3. С. 80-88.
8. Вовк О.Ю. Періодичне діагностування асинхронних двигунів за енергетичними показниками. Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем: матеріали І Всеукр. наук.-практ. Інтернет конференції пам'яті В.В. Овчарова. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 37-38.

9. 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.

10. Шавкун В.М. Методи моніторингу параметрів тягових електричних двигунів в процесі експлуатації рухомого складу міського електротранспорту [Текст] / В.М. Шавкун, В.М. Бушма // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – ХНАМГ.: технічні науки і архітектура, 2011. – Вип. 97. – С. 272-278.

11. Яцун М.А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів [Текст] / М. А. Яцун, А. М. Яцун. – Львів.: «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.

12. Шавкун В.М. Вплив періодичності діагностування на показники надійності тягових двигунів рухомого складу електротранспорту [Текст] / В.М. Шавкун, С.П. Шацький // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – ХНАМГ.: технічні науки і архітектура, 2011. – Вип. 101. – С.265-269.

13. Шавкун В.М. Діагностування тягових електричних машин електротранспорту/ В.М. Шавкун // Східноєвропейський журнал передових технологій. Вип. 1/7(67). – 2014, С. 48 – 52.

14. Kolcio K., Fesq L. (2016) Model-based off-nominal state isolation and detection system for autonomous fault management. IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2016-June. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500793.

15. Krobot Z., Turo T., Neumann V. (2017) Using vehicle data in virtual model for maintenance system support. ICMT 2017–6th International Conference on Military Technologies, 171-174. DOI: 10.1109/MILTECHS.2017.7988750

16. <https://electronoff.ua/ua/good/teplovizor-uni-t-util65a.php>

17. Qiu, Y., Zhang, W., Cao, M., & Feng, Y (2015). Infield D. An Electro Thermal Analysis of a Variable-Speed Doubly-Fed Induction Generator in a Wind Turbine. Energies, 8, 5, 3386–3402.

18. Hodgins, N., Mueller, M. A, & Tease, W. K. (2010). Staton D. Thermal model of an induction generator in oscillating water column wave energy converter. 5th

IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010).

19. Rygal, R., Moses, A. J., Derebasi, N., Schneider, J., & Schoppa, A. (2000). Influence of cutting stress on magnetic field and flux density distribution in non-oriented electrical steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 215–216, 687–689. DOI: 10.1016/S0304–8853(00)00259–6.

20. Zidarič, B., Zagirnyak, M., Lenasi, K., & Miljavec, D. (2006). Hysteresis losses in soft magnetic composite materials. *COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 25, 1, 157–168

21. Reinert J., Brockmeyer A., De Doncker R. W. Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting*. DOI: 10.1109/IAS.1999.806023.

22. В.В. Ченчевой, Ю.В. Зачепа, О.П. Чорний, Р.П. Яцюк, О.О. Ченчева, А.В. Некрасов, І.О. Кропивний. Теплова модель системи «асинхронний генератор–асинхронний двигун» при несиметрії в обмотках статора. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Випуск 2/2021 (54) С. 47-55

23. Zagirnyak, M., Chorny, O., Zachepa, I., & Chenchevoi, V. (2019). The autonomous sources of energy supply for the liquidation of technogenic accidents. *Przeglad Elektrotechniczny*, 95, 5, 47–50.

24. Uctug Y. & Demirekler M. (1988). Modelling, Analysis and Control of a Windturbine Driven Self-excited Induction Generator. *IEE Proceedings C on Generation, Transmission and Distribution*, 135, 4, 268–275.

25. Simoes M.G., & Farret, F.A. (2004). *Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators*. London: CRC Press.

ДОДАТОК А

Таблиця А1 – Матриця планування експерименту та результатів

№ з/п	Коефіцієнт несиметрії в електричному ланцюзі фази А статора АГ, ε_A	Коефіцієнт несиметрії в електричному ланцюзі фази В статора АГ, ε_B	Коефіцієнт несиметрії в електричному ланцюзі фази А статора АД, ε_{dA}	Коефіцієнт несиметрії в електричному ланцюзі фази В статора АД, ε_{dB}	Теплоємність, C_A , Дж/°С	Теплоємність, C_B , Дж/°С	Коефіцієнт несиметрії напруг, K_{2U} , %	Перевищення температури обмотки статора T , °С	Приріст теплової потужності ΔP , Вт
1	1,0	1,5	1,0	1,0	300	300	2,182	83,5	3158
2	0,8	0,8	1,2	0,8	320	280	1,098	87,1	3076
3	1,2	1,2	0,8	1,2	320	280	3,732	80,7	3157
4	0,8	0,8	0,8	1,2	320	280	0,307	87,0	3076
5	1,2	1,2	1,2	1,2	320	320	4,262	93,7	3198
6	1,0	1,0	0,5	1,0	300	300	0,556	69,4	3051
7	0,8	1,2	1,2	1,2	280	320	3,845	98,4	3164
8	0,8	0,8	1,2	1,2	320	320	0,260	101,4	3148
9	0,8	0,8	1,2	0,8	280	320	0,182	87,1	3078
10	1,2	1,2	0,8	0,8	320	320	4,195	72,2	3130
11	0,8	1,2	0,8	1,2	280	280	3,562	85,3	3100
12	1,2	1,2	0,8	0,8	280	280	2,918	71,4	3093
13	1,0	1,0	1,0	0,5	300	300	2,310	69,9	3035
14	1,2	0,8	1,2	0,8	280	280	4,330	84,8	3092
15	1,2	1,2	1,2	0,8	320	280	5,032	82,0	3126
16	1,2	0,8	0,8	0,8	280	320	3,578	74,5	3051
17	1,2	1,2	1,2	0,8	280	320	3,408	82,0	3129
18	1,2	0,8	0,8	1,2	320	320	4,444	84,3	3115
19	1,2	0,8	0,8	0,8	320	280	5,137	75,5	3066
20	1,0	1,0	1,0	1,0	300	252	1,723	84,8	3095
21	0,8	1,2	1,2	0,8	320	320	2,230	85,3	3111
22	0,8	0,8	0,8	0,8	320	320	0,331	76,5	3029
23	1,2	0,8	1,2	1,2	280	320	3,426	97,5	3162
24	0,8	0,8	1,2	1,2	280	280	0,563	101,0	3145
25	1,0	1,0	1,0	1,0	300	300	1,435	84,6	3098
26	1,0	1,0	1,0	1,5	300	300	0,871	96,7	3154
27	1,0	1,0	1,0	1,0	348	300	2,774	84,9	3104
28	1,0	1,0	1,0	1,0	300	348	1,355	84,9	3105
29	0,8	1,2	1,2	0,8	280	280	2,457	85,0	3105
30	0,8	1,2	0,8	0,8	280	320	3,519	74,9	3079
31	1,2	1,2	1,2	1,2	280	280	2,912	93,1	3174
32	1,2	0,8	1,2	0,8	320	320	5,608	85,3	3100
33	1,2	0,8	0,8	1,2	280	280	3,168	84,2	3100
34	0,8	0,8	0,8	0,8	280	280	0,445	76,3	3027
35	1,0	1,0	1,4	1,0	300	300	1,909	97,3	3146
36	0,8	1,2	0,8	0,8	320	280	2,024	74,2	3060
37	1,2	0,8	1,2	1,2	320	280	5,021	98,0	3177
38	1,0	1,0	1,0	1,0	252	300	0,534	84,8	3095
39	0,5	1,0	1,0	1,0	300	300	5,275	91,5	3108
40	0,8	1,2	0,8	1,2	320	320	3,227	85,5	3111
41	0,8	1,2	1,2	1,2	320	280	2,322	97,7	3153
42	1,0	1,0	1,0	1,0	300	300	1,438	84,6	3097
43	1,2	1,2	0,8	1,2	280	320	2,245	81,1	3156
44	0,8	0,8	0,8	1,2	280	320	1,232	87,2	3075
45	1,5	1,0	1,0	1,0	300	300	6,906	83,1	3158
46	1,0	0,5	1,0	1,0	300	300	3,388	91,3	3109