

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Аналіз методів діагностування електричних машин та перспектив їх розвитку
з метою підвищення енергетичної безпеки
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-1
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Олександр ТІМОХІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Ірина ПАНТЄЛЄЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Віктор ХОМЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Олександр ТІМОХІНУ

1. Тема «Аналіз методів діагностування електричних машин та перспектив їх розвитку з метою підвищення енергетичної безпеки»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від « 12 » 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: дані щодо термінів працездатності електрообладнання; терміни проведення ремонтів та оглядів; параметри електрообладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ДЕФЕКТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН; РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН; РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН; ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «_12_» _____ 10 _____ 2024_ р.

Керівник

(підпис)

Ірина ПАНТЕЛЄЄВА

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

_____ Олександр ТИМОХІН

(підпис)

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Олександр ТИМОХІН

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

на магістерську кваліфікаційну роботу
виконаний(у) на тему: «Аналіз методів діагностування електричних машин та перспектив їх розвитку з метою підвищення енергетичної безпеки» магістрантом
Олександром ТІМОХІНИМ

Магістерська робота складається з _____ сторінок __ __рисунків, _____
__ таблиць, _____ списку посилань.

Основна задача дослідження міститься у тому, що обслуговування та ремонт виконуються у залежності від реального технічного стану електричних машин, які контролюються у процесі експлуатації, засновуючись тільки на вимірюванні ряду основних параметрів.

Серед електричних пошкоджень в електричних машинах частіше всього пошкоджуються обмотки статорів ~37% та роторів ~9%, для діагностування яких існує ряд методів, але до їх недоліків можна віднести можливі помилки стосовно визначення технічного стану при зміні живлячої напруги та високочастотних перешкодах. Кореляція статичних і динамічних даних дає можливість незалежно оцінити реальний технічний стан двигуна різними методами та надати надійний прогноз його працездатності.

Мета дослідження – проведення аналітичного дослідження інтегрованих систем діагностики технічного стану електричних машин та перспектив їх розвитку з метою підвищення енергетичної безпеки.

Об'єкт дослідження – процес експлуатації електричних двигунів.

Предмет дослідження – методи діагностування пошкоджень двигунів при їх експлуатації.

Ключові слова: електроенергія, діагностика стану, електричний двигун, електрична машина, ієрархічна модель, електропостачання, електричні споживачі

ABSTRACT

for the master's qualification work
performed on the topic: "Analysis of methods for diagnosing electrical machines
and prospects for their development in order to increase energy security" by master's
student Oleksandr TIMOKHIN

The master's thesis consists of __pages, of drawings____, tables,____ list of
references.

The main objective of the study is that maintenance and repair are performed depending on the real technical condition of electric machines, which are monitored during operation, based only on the measurement of a number of basic parameters.

Among electrical damage in electric machines, the most common are stator windings ~37% and rotors ~9%, for the diagnosis of which there are a number of methods, but their disadvantages include possible errors in determining the technical condition when changing the supply voltage and high-frequency interference. The correlation of static and dynamic data makes it possible to independently assess the real technical condition of the engine by various methods and provide a reliable forecast of its performance.

The purpose of the study is to conduct an analytical study of integrated systems for diagnosing the technical condition of electric machines and the prospects for their development in order to improve energy security.

The object of the study is the process of operating electric motors.

The subject of the study is methods for diagnosing engine damage during their operation.

Keywords: electricity, condition diagnostics, electric motor, electric machine, hierarchical model, power supply, electrical consumers

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СЕП – система електропостачання

ЕД – електричний двигун

АД - асинхронний двигун

ДПС – двигун постійного струму

ТП – трансформаторна підстанція

КЗ – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПС – програмна система

НКМ – неоднорідна когнітивна модель

АГ – асинхронний генератор

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ
ВСТУП
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ДЕФЕКТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
1.1. Загальні дефекти електричних машин та їх профілактика
1.2. Виявлення та усунення дефектів електромеханічних систем на промислових підприємствах
1.3. Огляд методів контролю технічного стану асинхронних двигунів в процесі їх експлуатації
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
2.1. Огляд існуючих методів діагностування на прикладі електричних двигунів
2.2. Порівняльний аналіз методів технічного діагностування при оцінці технічного стану об'єктів
2.3. Інформаційні ознаки пошкодження обмотки статора для побудови релейного захисту
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2
РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
3.1. Аналіз методів діагностування електродвигунів постійного струму
3.2. Методика діагностики та ідентифікації дефектів обмоток асинхронного двигуна у режимі його функціонування
3.3. Розробка ієрархічних функціональних моделей процесу діагностування асинхронних двигунів з використанням методології IDEFO
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ
СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ВСТУП

Актуальність.

Найбільш розповсюджені електричні машини в системах електропостачання (СЕР) – це електричні двигуни. Асинхронні двигуни (АД) широко застосовуються у багатьох галузях господарства. Саме синхронним та асинхронним електроприводом споживається більше половини електроенергії, яка виробляється у світі. Однак їх ефективному використанню перешкоджає відносно велика ушкоджувальність, ~25% від загальної кількості встановлених електродвигунів (ЕД) щорічно. Це веде до порушення технологічних процесів, підвищеному браку продукції, додатковим витратам на їх відновлення та ремонт, а також на нормалізацію технологічного процесу. Непланові аварії, як правило, пов'язані зі значними економічними витратами, особливо в ключових галузях виробництва (енергетика, нафто- та газо здобич, транспорт тощо).

Оперативне діагностування технічного стану ЕД у робочих режимах або короткочасних остановах повинно знизити збиток від прецедентів за рахунок раннього виявлення дефектів. При проведенні, наприклад, планових ремонтів електричних машин, двигун піддається високовольтним випробуванням, які викликають появу в обмотці часткові розряди та мікро дефекти, що створюються у процесі роботи машини. Кожне таке випробування збільшує кількість дефектів та приводить до пошкодження електричного двигуна.

Для переходу з обслуговування та ремонту по регламенту на ремонт та обслуговування по фактичному стану, необхідно застосування методів діагностики не тільки тих, які відносяться до категорії функціональних, але й і до тих, які дозволяють виявити дефект конкретної частини електрообладнання.

Розробки та дослідження останніх років за кордоном та в Україні в питанні розвитку методів та засобів контролю та аналізу технічного стану ЕД дозволяє реалізувати технологію обслуговування «по стану», дуже актуальну для промисловості [1,2].

Основна задача міститься у тому, що обслуговування та ремонт виконуються у залежності від реального технічного стану електричних машин,

які контролюються у процесі експлуатації, засновуючись тільки на вимірюванні ряду основних параметрів.

Серед електричних пошкоджень в електричних машинах частіше всього пошкоджуються обмотки статорів $\sim 37\%$ та роторів $\sim 9\%$, для діагностування яких існує ряд методів, але до їх недоліків можна віднести можливі помилки стосовно визначення технічного стану при зміні живлячої напруги та високочастотних перешкодах.

Аналіз тенденцій в галузі технічної діагностики ЕД показує, що визначилось два напрями їх розвитку. Найбільш ефективними є підходи, пов'язані з одночасним отриманням більш повної інформації про наявність дефектів на відключених двигунах (статичні випробування) та у роботі (динамічні випробування). Кореляція статичних і динамічних даних дає можливість незалежно оцінити реальний технічний стан двигуна різними методами та надати надійний прогноз його працездатності.

Оцінка технічного стану проводиться у відповідності з критеріями стандартів України та США, встановленими інститутами EPRI (The Electric Power Research Institute) та IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Мета дослідження: проведення аналітичного дослідження інтегрованих систем діагностики технічного стану електричних машин та перспектив їх розвитку з метою підвищення енергетичної безпеки.

Задачі, що треба вирішити для досягнення мети дослідження:

- Визначити та класифікувати основні дефекти та можливі пошкодження електричних двигунів;
- Виявити дефекти електромеханічних систем на промислових підприємствах;
- Розглянути існуючі методи діагностування;
- Провести порівняльний аналіз методів технічного діагностування;
- Визначити перспективи розвитку методів діагностування ЕД;
- Розробити модель процесу діагностування двигунів.

Об'єкт дослідження – процес експлуатації електричних двигунів.

Предмет дослідження – методи діагностування пошкоджень двигунів при їх експлуатації.

Методи дослідження. Управління режимами електроенергетичними систем; комбінований метод аналізу надійності роботи електричних машин; системний; методологія структурного аналізу та проєктування; методи стохастичного моделювання; теорія обробки сигналів.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ДЕФЕКТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

1.1. Загальні дефекти електричних машин та їх профілактика

В даний час на промислових підприємствах використовуються в основному асинхронні машини, тому їх недоліки суттєво позначаються на продуктивності праці на підприємстві.

Дуже висока ефективність може бути досягнута навіть при частковій профілактиці несправностей в асинхронних машинах. Для цього необхідно виявити поточні недоліки асинхронного двигуна і запобігти або усунути їх.

Асинхронні двигуни в основному ушкоджуються під час руху, перевантаження, реверсу та гальмування. Пошкоджені двигуни будуть відремонтовані в установленому порядку.

Сьогодні частка відновлених асинхронних двигунів у виробництві зростає. Через неповне застосування технології ремонту можна помітити, що параметри роботи двигуна не відповідають паспортним даним. Зниження потужності двигуна значно впливає на викиди [3].

Ушкодження асинхронних двигунів класифікуються за різними критеріями. Двигуни в основному зустрічаються з механічними та електричними ушкодженнями. Механічне пошкодження АД включає деформацію валу ротора, ослаблення нерухомого статора, вихід з ладу підшипників, забруднення обертових частин тощо [3,4].

Причинами механічного пошкодження АД можуть бути наступні:

- асиметрія фаз, що викликає вібрацію двигуна;
- механічне навантаження валу двигуна;
- помилки при складанні вузлів двигуна;
- загальне механічне пошкодження асинхронних двигунів у середньому 10%.

Електричні пошкодження. Причини пошкоджень поділяються на 3 групи.

1. Аварії у мережі. В електромережі з різних причин (наприклад, вітер, грози, дощ тощо) відключають електроенергію. Це найчастіша причина поломок – зупинка асинхронного двигуна, 80% цих випадків відбувається через

падіння напруги або коливання, асиметрії, обриву фази, синусоїдальних збурень.

2. Пошкодження, спричинені великим струмом. Причина цього – перевантаження двигуна, міжфазні або проміжні короткі замикання (КЗ), погіршення ізоляції та інші причини.

3. Ушкодження через зниження опору внаслідок зносу, вологи, розриву ізоляції.

Крім того, пошкодження в асинхронних двигунах поділяються на 2 групи: зовнішні та внутрішні.

До зовнішніх належать:

1) неправильне підключення двигуна до мережі чи відключення мережних проводів;

2) горіння накопичувального розчинника;

3) подача напруги на двигун більше або менше від номінального;

4) неправильна робота або підключення робочого чи контрольного обладнання;

5) навантаження двигуна;

6) несправність чи відмова системи вентиляції двигуна.

Внутрішні пошкодження діляться на механічні та електричні.

До механічних пошкоджень належать:

1) ушкодження підшипника;

2) деформація чи поломка ротора;

3) ослаблення чи поломка ручок щітки;

4) поява глибоких борозенок на контактних кільцях чи щітках;

5) неправильне кріплення або ослаблення статора до корпусу;

6) тріщини в підшипниках та корпусі.

Електричні пошкодження:

1) перекриття;

2) прориви;

3) коротке замикання між корпусом та обмотками;

4) знос ізоляції.

Найбільш часті пошкодження асинхронних двигунів:

- 1) перевантаження двигуна та горіння обмотки статора - 31%;
- 2) міжмережне з'єднання – 15%;
- 3) пошкодження підшипників – 12%;
- 4) пошкодження обмотки статора або втрата ізоляції – 11 %;
- 5) нерівномірний повітряний зазор між статором та ротором – 9 %;
- 6) робота двигуна на 2-х фазах – 8 %;
- 7) пошкодження короткозамкнених штоків ротора – 5 %;
- 8) неправильне закріплення чи ослаблення статора – 4 %;
- 9) нерівномірний розподіл навантаження на ротор - 3%;
- 10) неправильне балансування осі ротора - 2%.

На рисунку 1.1 показаний розподіл (у відсотках) приведених пошкоджень.

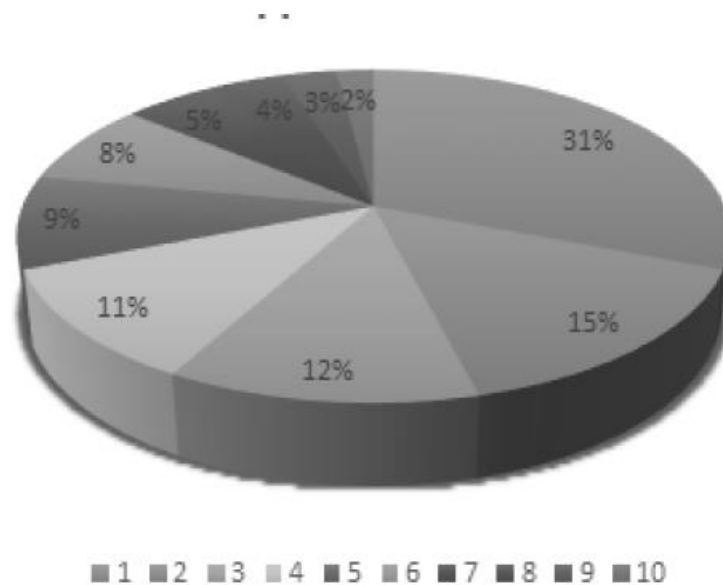


Рисунок 1.1 – Розподіл приведених пошкоджень в АД

Один із випадків, що зустрічаються в асинхронному двигуні - це коли двигун підключений до мережі, що спостерігається. Це відбувається тому, що двигун не має крутного моменту. Причини, з яких у двигуна немає крутного моменту, наступні:

1. Обрив у мережі або вихід з ладу контактів у приводі («спалювання сховища»).
2. Одна фаза ланцюга – «зірка» – відключена або підключена до

«трикутника», якщо дві фази перервані.

3. Дві чи три фазні котушки ротора зламані.

В результаті нагріву при експлуатації та зберіганні машини, механічних впливів при вібрації, відцентрових та електродинамічних сил, впливу вологості та агресивних середовищ поступово виходить із ладу ізоляція пакета. Незначна зміна хімічного складу називається старінням структурної ізоляції. Процес погіршення ізоляційного складу називається зносом.

В асинхронних двигунах часто виходить із ладу статор. Це 85–95% причин того, що двигун не працює. Причина виходу зі строю - короткі замикання. Під дією вібрації починається поступове розмивання лаку, жили, розташовані близько один до одного, і ізоляція розкладається, котушки, що перекриваються, утворюють коротке замикання. Опір коротко замкнутого ланцюга невеликий, тому сила струму зростає, температура ізоляції збільшується, внаслідок чого обмотка темніє.

1.2. Виявлення та усунення дефектів електромеханічних систем на промислових підприємствах

До виявлення дефектів електромеханічних систем на промислових підприємствах відносяться заходи щодо експлуатації електрообладнання у межах встановлених нормативних показників, підвищенню якості обслуговування, підтримці технологічного електрообладнання в оптимальному робочому режимі тощо [5]. Основним експлуатованим у виробництві електрообладнанням є електровимірювальне та освітлювальне обладнання. Основна частина споживання електроенергії підприємством припадає на електропривід технологічних машин. Оптимізація режимів роботи електроприводів та використання регульованих електроприводів забезпечують більшу економічну ефективність. На неефективну роботу електроприладів можуть впливати різні чинники.

Важливу роль у забезпеченні нормальної роботи електродвигунів грає якість живлення, рівень перенапруги, наявність у мережі високочастотних гармонійних складових струму та напруги, небаланс фаз (рис.1.2).

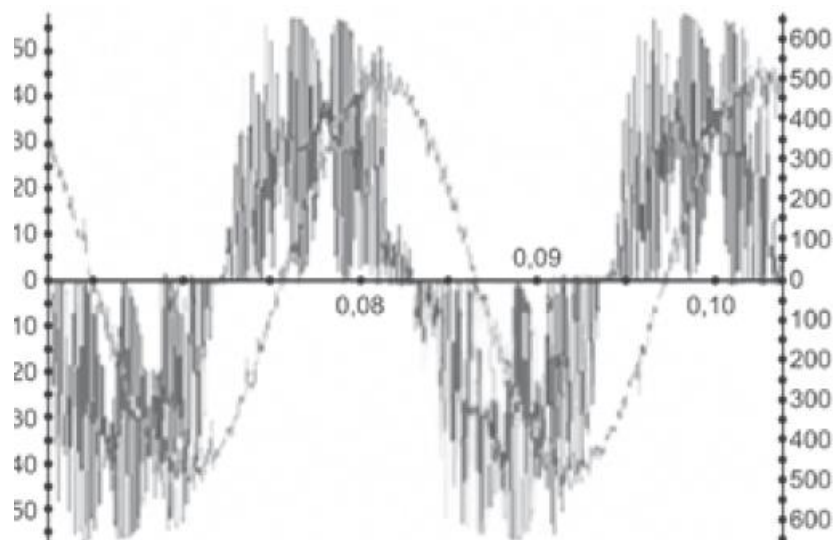


Рисунок 1.2 – Осцилограма напруги і струму для неякісного ланцюга живлення двигуна

Технічний стан електродвигунів визначається вимірами опору ізоляції, опорів обмоток постійному та змінному струму та результатами високовольтних випробувань на вимкненому двигуні. На працюючих електродвигунах проводиться вимірювання статорних струмів обмоток та вібраційний і тепловізійний контроль корпусних елементів, вузлів приєднання і підшипників. Як видно, повний контроль параметрів двигуна вимагає проведення значної кількості різноманітних вимірювальних операцій, вимірювальних приладів. Як правило, повною мірою подібні виміри оперативним персоналом не виконуються.

При відсутності в напругі живлення потужних імпульсних перешкод, при роботі двигуна може бути визначені дефекти пайок роторної обмотки по гармоніці нижньої бічної частини напруги живлення. Рівень гармоніки нижньої бічної частоти не повинен перевищувати -35 dB від основної частоти мережі живлення (рис.1.3) [6].

На вимкненому двигуні вимірюються міжфазні та активні опори обмоток постійному струму, індуктивність, імпеданс і кутова залежність струму від частоти (вимірювання проводяться на підвищених частотах, до 1200 Гц), напруги вбудованого у прилад генератора живлення (рис.1.4). Дані параметри необхідні для виявлення та оцінки найбільш небезпечних дефектів виткового

замикання обмотки статора, ротора, а також ексцентриситет ротора.

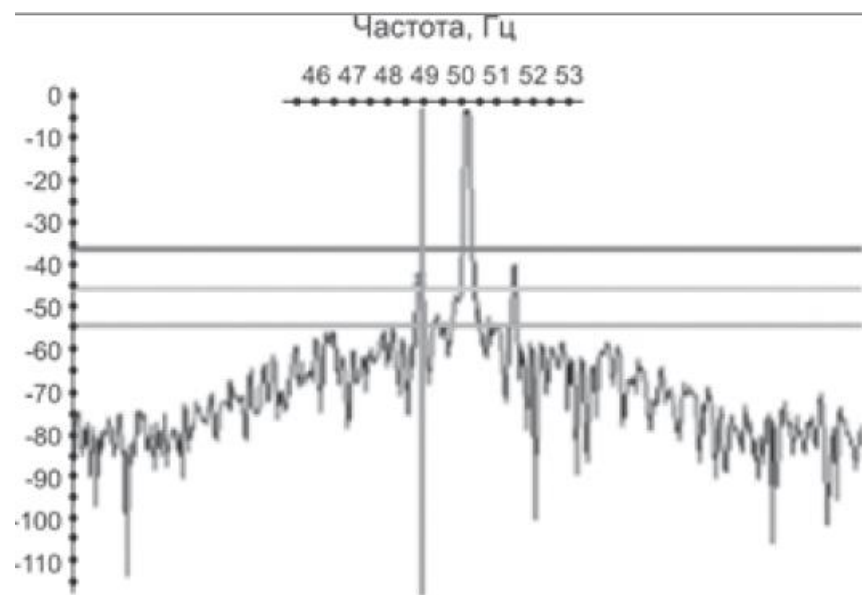


Рисунок 1.3 – Дані гармонійного аналізу на працюючому двигуні з дефектом обмотки ротора

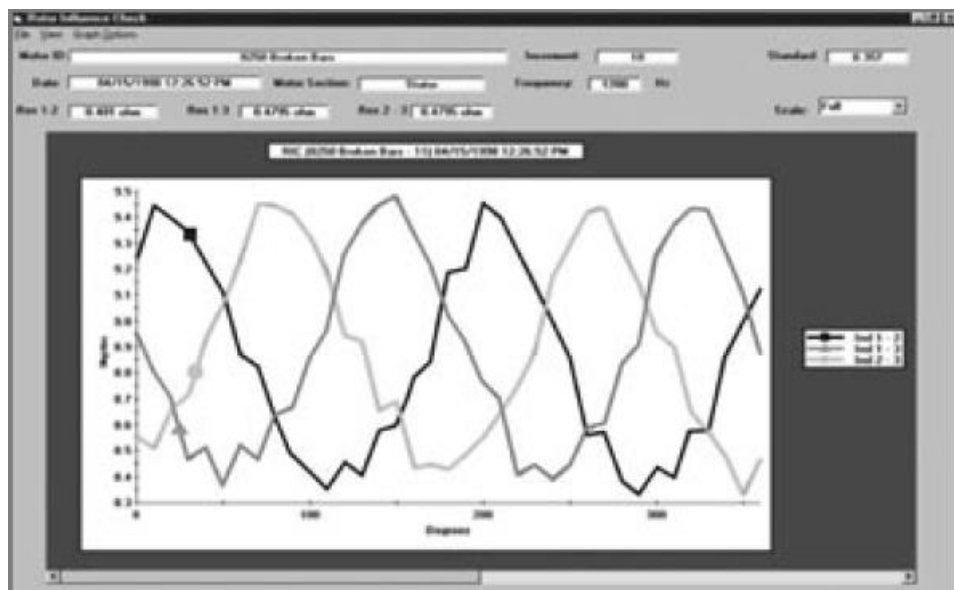


Рисунок 1.4 – Дані гармонійного аналізу на відключеному двигуні з дефектом обмотки ротора

Треба мати можливість віддаленого контролю та автоматизації процесу вимірювань, що дає можливість здійснювати систематичний контроль значного парку машин із низькими трудовитратами. Об'єктивні дані про технічний стан скорочує кількість позапланових зупинок через передчасний вихід з ладу двигуна і дозволяє своєчасно планувати його ремонт чи заміну.

1.3. Огляд методів контролю технічного стану асинхронних двигунів в процесі їх експлуатації

Вітчизняний та зарубіжний досвід показує, що впровадження засобів діагностування є одним із найважливіших факторів підвищення економічної ефективності використання обладнання у промисловості [7].

Призначення діагностики – виявлення та попередження відмов та пошкоджень, підтримка експлуатаційних показників у встановлених межах, прогнозування стану з метою повного використання ресурсу.

Таким чином, завдання зниження рівня прямих та непрямих витрат у процесі експлуатації асинхронних двигунів, підвищення якості їх діагностики, а також підвищення їх надійності актуальні на сьогодні у будь-якій галузі виробництва. Як об'єкти дослідження розглянуті загальнопромислові асинхронні двигуни середньої потужності, що застосовуються (від 1 до 400 кВт).

Вибір стратегії та методів діагностування асинхронних двигунів визначається рядом факторів. Першорядне значення має кінцева мета діагностування, яка залежить від того, на якому етапі життєвого циклу визначається технічний стан двигуна: на етапі виробництва, експлуатації чи ремонту.

На етапі виробництва важливо забезпечити оптимальне проєктування та доведення конструкції, орієнтуючись на забезпечення надійності і довговічності, а також контроль якості виготовлення деталей та їх монтажу. Основні види несправностей в умовах серійного виробництва: кінематичні помилки виготовлення деталей, вихід параметрів за допустимі межі за точністю та дефектами складання, до яких відносяться невірноваженість, наявність ексцентриситету, різного роду перекося, зазори, відносні усунення взаємодіючих деталей, недотримання технології змащення тощо. На етапі експлуатації внаслідок природного процесу старіння елементів з часом напрацювання відбувається зміна параметрів двигунів, що призводить до пошкоджень та поломок.

За швидкістю розвитку експлуатаційні дефекти ділять на дві категорії: що швидко розвиваються, які викликають раптові відмови, та ті, що повільно розвиваються. До 1-ї категорії відносяться важко прогнозовані відмови, які є наслідком виробничих технологічних дефектів або руйнування під дією навантаження, яке миттєво виникає, та яке перевищує межу міцності елементів. До 2-ї категорії відносяться несправності, виникнення та розвиток яких може бути зареєстровано, спрогнозовано та проконтрольовано до їх критичного рівня.

При правильній організації експлуатації асинхронних двигунів вид несправності та обсяг ремонту можна визначити заздалегідь, до настання критичного стану механізму. Діагностика на етапі ремонтних робіт зводиться до післяремонтного контролю технічного стану. До обсягу діагностування необхідно включати та перед ремонтну оцінку технічного стану машин [7,8].

Сучасні системи та методи діагностики асинхронних двигунів можна розділити на дві групи.

До 1-ї групи належать методи тестової діагностики. Це вимір опору ізоляції, струмів виток, внутрішнього опору обмоток, тангенсу кута діелектричних втрат обмоток, метод високовольтного імпульсу та ін. Тестове діагностування – основний вид виявлення дефектів електродвигунів у вітчизняній енергетиці. Воно визначило сформовану структуру технічного обслуговування та ремонту за регламентом. Така діагностика сприяє не тільки попередженню розвитку різних дефектів, а й їхню появу. До недоліків тестової діагностики можна віднести також тимчасове припинення роботи електродвигуна, відсутність можливості захисного відключення обладнання під час його роботи для запобігання повному виходу його з ладу, відсутність контролю ненормальних режимів роботи даного обладнання.

Друга група включає методи функціональної діагностики. Вони економічно найкращі, тому що не вимагають тимчасового виведення електрообладнання з експлуатації. Для підготовки до ремонту необхідно виявити всі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови.

В даний час відомі такі методи діагностики асинхронних двигунів:

- засновані на аналізі вібрацій окремих елементів агрегату;
- на аналізі акустичних коливань, створюваних працюючою машиною;
- на вимірі та аналізі магнітного потоку в зазорі двигуна та зовнішнього магнітного поля;
- на вимірі та аналізі температури окремих елементів машини;
- діагностики механічних вузлів (зокрема, підшипників), що ґрунтуються на аналізі вмісту заліза в олії;
- засновані на аналізі електричних параметрів машини;
- діагностики стану ізоляції.

Методи вібродіагностики набули найбільш широкого поширення. Суть методів полягає в аналізі вібраційних параметрів у різних точках електродвигуна. До вібраційних параметрів відносяться вібропереміщення, віброприскорення та віброшвидкість. Реєстрації підлягають як діючі (середньоквадратичні) значення, так і пік-фактор. Велике поширення отримали також методи спектрального аналізу, в яких як діагностичні параметри використовують значення амплітуди окремих гармонічних складових вібраційного сигналу. Головними недоліками вібродіагностики є: необхідність використання спеціальних віброакустичних датчиків, складність їх встановлення та складність інтерпретації результатів. Вібродіагностика дозволяє визначати дефекти підшипникового вузла, ексцентриситету та в меншому ступені – дефекти обмотки статора. При цьому аналіз відмов електродвигунів показує, що до 80 % електродвигунів виходять з ладу через дефекти обмотки статора [7, 10]. Методи акустичної емісії також недостатньо чутливі саме до електричних пошкоджень низьковольтних двигунів [10].

Методи, засновані на вимірі та аналізі магнітного потоку в зазорі двигуна, поширені для високовольтних машин (від 6 кВ та вище). Встановлення датчиків магнітного поля потребує безпосереднього доступу до об'єкта діагностування. Встановлення датчиків магнітного поля (елементів Холла або магніторезисторів) можливе лише при виготовленні машини чи її ремонті.

Методи тепловізійного контролю дозволяють досить точно визначати стан підшипникових вузлів електричних машин. Однак для контролю внутрішніх

пошкоджень та ізоляції машини вони непридатні.

Методи, засновані на аналізі змісту заліза в маслі, широко застосовуються для діагностики механічних вузлів приводів. Однак ці методи визначають стан механізму за непрямими ознаками, що не дозволяє своєчасно виявити ушкодження, що розвиваються.

Останнім часом широко розвиваються методи діагностики стану асинхронних двигунів, засновані на контролі споживаного струму з подальшим виконанням спеціального спектрального аналізу отриманого сигналу. Це дозволяє з високим ступенем достовірності визначати стан різних елементів двигуна. Наявність у спектрі струму двигуна характерних частот певної величини свідчить про наявності пошкоджень електричної та/або механічної частини електродвигуна та пов'язаного з ним механічного пристрою [9,11].

Недоліком спектрального аналізу струму асинхронного двигуна є складність оцінки результатів.

Метод діагностування стану АД на основі спектрального аналізу векторів Парку струму та напруги порівняно з іншими способами діагностики має ряд переваг:

- розширення переліку діагностованих ушкоджень та підвищення точності діагностування;

- діагностика стану електродвигунів методом спектрального аналізу спектрів модуля векторів Парку дозволяє виявити основні види дефектів електродвигуна та пов'язаного з ним механічного пристрою;

- зниження трудомісткості процедури діагностування. Це зумовлено тим, що при збігу ліній у спектрах модуля вектору Парку струму та напруги, відсутня необхідність перевірки стану спектра на кожній характерній частоті при кожній операції діагностики кожного електродвигуна;

- забезпечення можливості дистанційного діагностування (на відстані від електродвигуна – в електрощиті живлення та/або управління);

- спрощення процедури діагностування: не потрібно відключення електродвигуна та/або зняття навантаження;

- Забезпечення можливості повної автоматизації процесу діагностики.

Загальним недоліком методу спектрального аналізу струму статора та спектрального аналізу модулів векторів Парку струму та напруги є необхідність урахування впливу на електричні параметри приводу параметрів живильної мережі, характеру навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів у приводі.

Контроль стану ізоляції високовольтних асинхронних двигунів у процесі експлуатації може бути здійснено кількома методами. Сучасні, найефективніші методи діагностики параметрів ізоляції наступні:

- контроль вібрації секцій обмоток статора в пазах та в зоні лобових частин;

- контроль пульсацій радіальної складової магнітного поля в зазорі;

- контроль часткових розрядів в ізоляції обмотки статора.

Контроль стану ізоляції статорів асинхронних двигунів за рівнем та розподілом часткових розрядів можливий для двигунів, робоча напруга яких становить від 4 кВ і вище. Для двигунів, що працюють при меншій робочій напрузі статорної обмотки, виникнення дефектів в ізоляції не завжди супроводжується появою часткових розрядів. З цієї причини ефективність застосування цього методу для низьковольтних двигунів невисока.

Одним з найважливіших питань, що виникають при проведенні діагностики стану ізоляції за частковими розрядами, є вибір діапазону частот, в якому передбачається проводити вимір параметрів часткових розрядів. Без вирішення цього питання важко бути впевненим у достовірності кінцевих діагнозів. На практиці використовується вимірювальне обладнання, що працює у високочастотному діапазоні (від 0,5 до 80,0 МГц). Для реєстрації часткових розрядів в обмотках статорів асинхронних двигунів використовуються високочастотні трансформатори струму та конденсатори зв'язку. Вимірювальне обладнання, що працює в інших діапазонах частот, отримало мале поширення.

Застосування акустичного методу реєстрації часткових розрядів утруднено через екранування активних частин статора елементами конструкцій машин. Для приладів, що працюють у надвисокочастотному діапазоні частот,

корпус статора також є непереборною перешкодою на шляху реєстрації електромагнітного випромінювання від часткових розрядів.

Усі проблеми з ізоляцією обмотки статора АД виникають зазвичай у наступних трьох основних зонах:

- у пазах пакета статора між секцією обмотки та сталлю пакета статора або між двома секціями обмотки, що належать різним фазам обмотки;

- на зрізі пакета статора при фазній напрузі через проблеми напівпровідного покриття в ізоляції секцій;

- у лобових частинах секцій обмотки статора під впливом лінійної напруги між фазами обмотки.

Аналіз сучасних діагностичних комплексів показав, що для підвищення достовірності діагностики технічного стану асинхронних двигунів необхідно вдосконалення існуючих та розробка нових методів та засобів діагностики асинхронних двигунів в процесі експлуатації.

Незважаючи на велику кількість методів діагностики електродвигунів, питання продовжує залишатися актуальним з низки причин. Серед них - відсутність надійних критеріїв оцінки технічного стану, динаміки розвитку дефектів, відсутність методів прогнозування залишкового ресурсу, недостатня дослідженість окремих пошкоджень двигунів, а також те, що не визначені спеціальні діагностичні параметри, що характеризують зміну процесів функціонування у разі виникнення відповідних несправностей. Наявні критерії враховують лише граничні або допустимі стани параметрів, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії розвитку.

Таким чином, проблема діагностики асинхронних двигунів полягає у необхідності створення універсального, простого методу визначення технічного стану ЕД. Це дозволить до мінімуму знизити збитки від пошкоджень асинхронних двигунів за рахунок раннього виявлення виникаючих дефектів [12]. Бажаною умовою є вимірювання діагностичних параметрів функціонуючого приводу без виведення двигуна з процесу виробництва та транспортування його на спеціалізовані стенди. Винятком є діагностика після ремонту машин.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

У розділі було проаналізовано загальні відомості про основні дефекти електричних машин на прикладі електричних двигунів.

Зроблений огляд методів контролю технічного стану АД в процесі їх експлуатації.

Незважаючи на велику кількість методів діагностики електродвигунів, питання продовжує залишатися актуальним з низки причин. Серед них - відсутність надійних критеріїв оцінки технічного стану, динаміки розвитку дефектів, відсутність методів прогнозування залишкового ресурсу, недостатня дослідженість окремих пошкоджень двигунів, а також те, що не визначені спеціальні діагностичні параметри, що характеризують зміну процесів функціонування у разі виникнення відповідних дефектів. Наявні критерії враховують лише граничні або допустимі стани параметрів, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії розвитку.

Таким чином, проблема діагностики асинхронних двигунів полягає у необхідності створення універсального, простого методу визначення технічного стану ЕД. Це дозволить до мінімуму знизити збитки від пошкоджень асинхронних двигунів за рахунок раннього виявлення виникаючих дефектів.

Бажаною умовою є вимірювання діагностичних параметрів функціонуючого приводу без виведення двигуна з процесу виробництва та транспортування його на спеціалізовані стенди. Винятком є діагностика після ремонту машин.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

2.1. Огляд існуючих методів діагностування на прикладі електричних двигунів

В умовах великого виробництва завжди актуальна проблема безаварійної роботи всього електроустаткування. Тому в цьому розділі роботи наведено короткий огляд відомих методів неруйнівної діагностики електрообладнання.

Вібраційна діагностика є одним із самих поширених методів контролю технічних систем та пристроїв, заснованих на розборі параметрів вібрації: або згенерованої працюючим обладнанням, або є вторинною вібрацією, яка залежить від структури випробуваного об'єкта. Вібродіагностика – неруйнівний спосіб контролю технічного стану агрегату загалом чи окремих його елементів по виникаючим у процесі експлуатації агрегату акустичним сигналам. На рис.2.1 показане зняття показань вібрації на електродвигуні.



Рисунок 2.1 - Зняття показань вібрації на електродвигуні

Метод дозволяє здійснити перехід від планово-попереджувального ремонту на більш прогресивні методи діагностування обладнання без виведення машини з експлуатації. При цьому виді діагностики може розглядатися сигнал вібрації в часовій та частотній області спектра. Сигнал, який показує стан об'єкта є: вібропереміщення, віброшвидкість та віброприскорення. Одним з найбільш застосовуваних датчиків вібрації найчастіше є датчики, що виконують функцію віброперетворення прискорення.

Стационарні системи моніторингу та діагностики найбільш ефективні для агрегатів з однаковими електроприводами, у яких постійне навантаження та швидкість обертання – вентиляторних, компресорних та, зокрема, насосних пристроїв.

Розбір серійних діагностичних систем показує, що в даний час немає готових систем, які відповідають вимогам промислових підприємств щодо їх вартості та можливості застосування до виробничих умов. Система вібродіагностики має бути максимально уніфікована для конкретних машин та обладнання, мати можливість не лише показувати вид несправності у конкретному вигляді, а й прогнозувати розвиток дефектів, давати рекомендації щодо вигляду та термінів технічного обслуговування та ремонту, розраховувати конкретні терміни наступних діагностичних обстежень. На рис.2.2 показаний процес зняття струму ЕД (діагностика по струму).



Рисунок 2.2 - Зняття параметрів струму з електродвигуна

Діагностика струму електродвигуна базується на використанні сучасних апаратно-програмних комплексів, що дозволяють створити систему моніторингу стану електродвигуна на основі дослідження струмових діаграм та

аналізу спектрів за допомогою застосування сучасних математичних методів, таких як перетворення Фур'є тощо. При цьому можна виявити дефекти в механічній системі, а також ті, що виникли в обмотці статора та вузлі ротора.

Діагностика двигунів проводиться за наведеними в результаті появи дефектів змінним магнітним полям у повітряному зазорі електродвигуна, та наведеними цими полями змінними складовими струму в його обмотках, які відмінні за частотою від основної частоти споживаного струму. Під моніторингом стану електродвигуна по споживаному струму приймається періодичний або безперервний вимір величин змінних складових у спектральній складовій струму, яка відповідає за певні дефекти в випробуваному двигуні та механізмі, що використовується для навантаження, подальшим аналізом їх розвитку у процесі експлуатації.

В наш час використовують напівстаціонарні та стаціонарні системи струмової діагностики та, особливо, стаціонарні системи перед аварійної сигналізації складних агрегатів. Найчастіше така система застосовується до механізмів із великою кількістю вузлів, що обертаються з різною швидкістю.

Основними недоліками цього методу є необхідність урахування впливу на електричні параметри двигуна параметрів мережі живлення, характеру навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів у двигуні та складність обробки даних [13].

На рис.2.3 показаний процес теплового контролю ЕД.

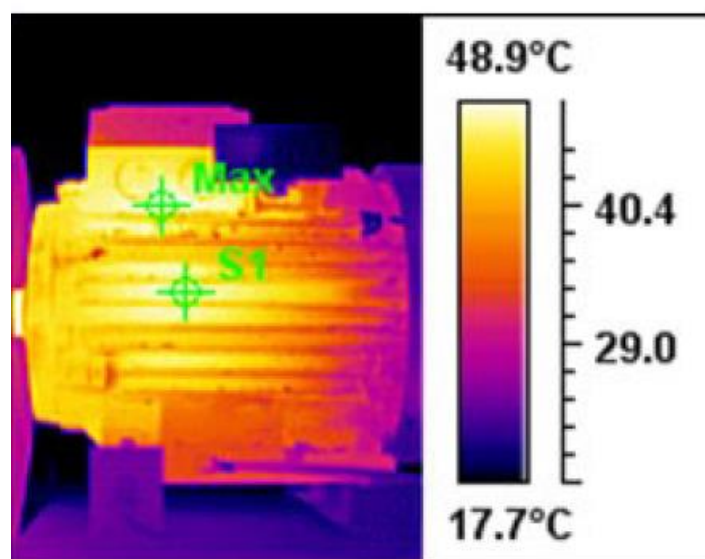


Рисунок 2.3 - Теплова картина нагріву асинхронного двигуна

Тепловізійний контроль електричних машин базується на застосуванні тепловізійної дефектометрії електроустаткування. На даний момент для відстеження технічного стану промислового обладнання найчастіше застосовуються засоби вимірювання температури, такі як тепловізори, інфрачервоні камери, пірометри та ін. Такі прилади роблять можливим у більшості випадків здійснювати безперервний контроль усіх необхідних вузлів під час роботи.

Пірометри показують температуру в окремих точках об'єкта, у той час як тепловізори та інфрачервоні камери демонструють повну картину розподілу температури на об'єкті. Діапазон вимірювання температури для термографії знаходиться приблизно від -50°C до більш ніж 2000°C . Інфрачервона термографія, теплове відео або теплове зображення – це науковий спосіб отримання термограми – зображення в інфрачервоних променях, що демонструє картину розподілу температурних величин. Термографічні камери, або тепловізори, показують випромінювання в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру (приблизно $0,9\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$) та на основі цього випромінювання створюють зображення, які дозволяють визначити перегріті чи переохолоджені місця не тільки оператору, а й навіть людині, яка не має спеціального навчання.

Сучасні тепловізори вміють за допомогою спеціального програмного забезпечення показувати температуру у кожній точці термограми. Але треба враховувати таку проблему як несприйнятливість термографа до сильних електромагнітних полів, що зобов'язує оператора розташовувати приймач на необхідній відстані від механізму для отримання термограм з детальним зображенням теплового поля частин статора чи поверхні лобових частин обмотки. Обстеження тепловізором (термографія) дозволяє наочно оцінити умови роботи та ступінь зносу устаткування чи його окремих вузлів.

Перевагою тепловізійного обстеження з використанням тепловізора є те, що зйомка обладнання проводиться дистанційно, в його експлуатаційних умовах, під діючими навантаженнями без виведення обладнання з експлуатації, демонтажу чи будь-якої попередньої підготовки. Таким чином, тепловізор

використовується як пристрій неруйнівного технічного контролю стану обладнання при відстеженні всіх вузлів у складі електричної машини та при проведенні випробувань після ремонту. За допомогою тепловізора можна визначити стан силових вводів, клемних коробок та інших різних підключень. Недоліками цього способу діагностики є висока інерційність теплових процесів, відсутність розвиненої методики ідентифікації дефектів (для виявлення дефектів потрібна ціла лабораторія). Слід зазначити те, що тепловізор не завжди застосовується в гарячих цехах внаслідок негативних складових температури гарячого металу, що впливають.

Підсумовуючи, можна дійти невтішного висновку про відсутність універсального способу діагностування електродвигунів. Кожен із розглянутих методів має свої плюси та недоліки. Тому необхідно вибрати спосіб діагностування, спираючись на тип експлуатованого механізму.

2.2. Порівняльний аналіз методів технічного діагностування при оцінці технічного стану об'єктів

Першим завданням технічного діагностування вважають контроль технічного стану, тобто перевірку відповідності значень параметрів механічного вузла вимогам технічної документації та визначення на цій основі одного із заданих видів технічного стану в даний момент часу.

Другим завданням технічного діагностування є діагностування з метою визначення місць і, при необхідності, причин і видів дефекту механічного вузла. Таке діагностування називають пошуком дефектів. Аналіз стану справного механічного вузла називається діагностуванням дефектів, що зароджуються, а несправного – пошуком виниклої несправності.

Третє завдання технічного діагностування – прогнозування технічного стану механічного вузла із заданою ймовірністю на майбутній інтервал часу [13].

При проведенні технічного діагностування для виявлення аномалій виділяють дві основні проблеми:

- ймовірність пропуску несправності;

- ймовірність «хибної тривоги», тобто вірогідність помилкового сигналу про наявність дефекту [3,15].

Чим вище ймовірність «хибної тривоги», тим менша ймовірність пропуску несправності, і навпаки. Завдання технічної діагностики несправності полягає у знаходженні «золотої середини» між цими двома проблемами.

В цілому, класифікація методів технічної діагностики не встигає за розробкою нових способів випробувань матеріалів та виробів, багато з яких використовують комбінацію кількох фізичних явищ.

Оскільки методів технічного діагностування, як було зазначено, досить багато, вважається актуальним провести порівняльний аналіз двох найбільш перспективних та затребуваних методів – вібраційного та теплового – з метою на практиці за допомогою цих методів діагностувати технічний стан герметичного компресора побутової холодильної машини в умовах невеликої ремонтної майстерні з обмеженими ресурсами.

Основним завданням вібраційної діагностики є розпізнавання стану технічної системи в умовах експлуатації, коли отримання інформації вкрай утруднене. Часто зробити однозначний висновок не представляється можливим і доводиться використовувати статистичні методи. Як вихідні дані для вирішення діагностичних завдань використовуються безмірні діагностичні параметри, що характеризують стан вихідного об'єкта.

Перехід до безрозмірних значень проводиться при нормуванні вихідних параметрів щодо верхнього порогу:

$$X_i = \frac{X_i}{[X_i]}, \quad (2.1)$$

де: X_i - Вихідний параметр; X_i - нормоване значення параметра; $[X_i]$ – верхнє допустиме значення параметра.

Узагальнений показник наявності дефекту формується у вигляді логіко-алгебраїчних об'єднувальних виразів методами головного критерію (визначає параметр) або регресивного рівняння.

Для врахування особливостей об'єкта і з метою підвищення достовірності діагнозу у виразі для узагальненого показника наявності дефекту вводяться евристичні (експертні) коефіцієнти впливу.

Узагальнений показник наявності дефекту Q може бути представлений у вигляді математичного виразу:

$$Q = R_k (p_1 q_1 X_1 + \dots + p_2 q_2 X_2 + p_n q_n X_n) / n ,$$

де: p_i – експертні (евристичні) коефіцієнти впливу; q_i – коефіцієнти логічних відносин; R_k - експертний (евристичний) коефіцієнт.

Узагальнений показник наявності дефекту Q при даному підході є безрозмірною величиною, що змінюється в діапазоні $(0 \div 1)$ при прояві дефекту та приймає значення більше 1 при явно вираженому дефекті. У цьому випадку розпізнавання дефекту зводиться до порівняння узагальненого показника наявності дефекту Q з нормованими рівняннями стану. Також формалізується і завдання прогнозування розвитку конкретного дефекту при екстраполяції тимчасових тенденцій узагальненого показника наявності дефекту Q на прогнозованому інтервалі часу.

Реєстрація базових діагностичних параметрів проводиться при моніторингових вимірах по кожному з напрямків вимірювання вібрації у всіх точках установки датчиків і використовуються для оцінки стану та виявлення основних дефектів.

До складу базових діагностичних параметрів входять:

- інтегральні вібраційні параметри оцінки стану;
- інтегральні вібраційні параметри;
- невібраційні параметри;
- параметри вібраційного процесу у смузі частот;
- кратні оборотній частоті гармонійні складові.

Основними методами вібраційної діагностики, що використовуються при розв'язанні задач моніторингу та функціональної діагностики машин, є:

- вимірювання загального рівня вібрації;
- спектральний аналіз;
- аналіз характеристики розгону/вибігу агрегату;
- пік-фактор;
- ексцес;
- контурна характеристика;
- метод ударних імпульсів (SPM-метод Shock Pulse Method);
- аналіз траєкторії руху.

Варто зауважити, що значна частина методів вібродіагностики призначена для конкретних видів діагностики тих чи інших вузлів та агрегатів машин.

Перевага, наприклад, методу діагностики підшипників за значенням ексцесу перед іншими методами аналізу віброакустичного сигналу в тому, що даний метод не потребує знання геометричних параметрів підшипника. Крім того, він не чутливий до змін швидкості обертання валу та навантаження. Для правильної оцінки стану підшипників кочення необхідно правильно вибирати частотні діапазони для розрахунку значень ексцесу. До недоліків методу можна віднести неможливість визначити тип дефекту.

Зняття та подальший аналіз контурної характеристики є ще одним найпростішим методом контролю, що дозволяє отримати оцінку технічного стану агрегату. Контурна характеристика знімається за допомогою вимірювання параметрів вібрації. Через певний проміжок часу проводиться зняття нової. Показники, її аналіз та порівняння з попередньою (рис.2.4).

Метод ударних імпульсів (SPM-метод Shock Pulse Method) заснований на вимірі відношення пікового та середньоквадратичного значень віброприскорення механічних коливань, що називається пік-фактором. Принцип дії методу ударних імпульсів показаний на рис.2.5, де стан підшипника визнається за діаграмою.

Переваги методу ударних імпульсів визначаються відсутністю вимог до періодичності прямування цих імпульсів.

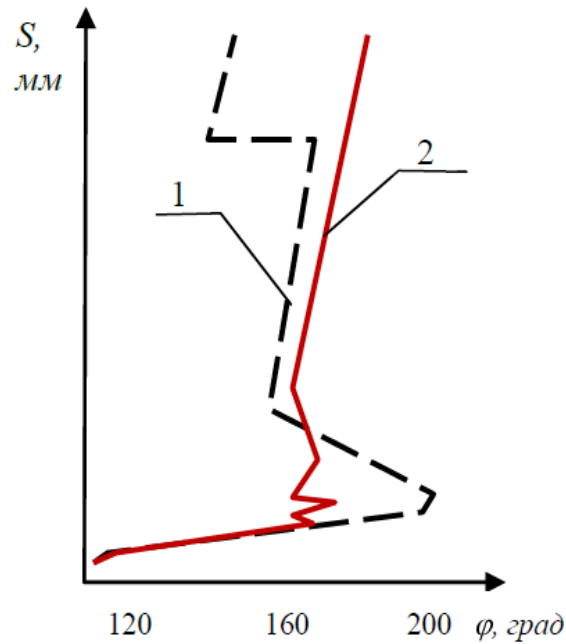


Рисунок 2.4 - Зняття контурної характеристики: 1- Контурна характеристика у початковий період; 2 – з часом

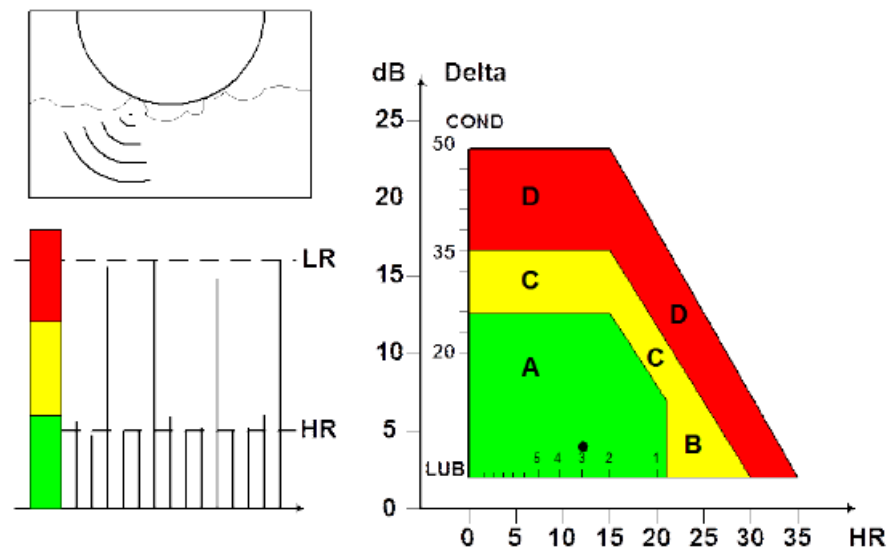


Рисунок 2.5 - Визначення стану підшипникового вузла методом ударних імпульсів

Головним недоліком методу є той факт, що не всі дефекти, що зароджуються, призводять до появи ударних імпульсів. Часто дефектний вузол виявляється незадовго до відмови, коли в ньому розвивається ланцюжок пов'язаних дефектів, один або кілька з яких стають джерелом ударних імпульсів. У цьому випадку частота прямування ударних імпульсів може бути настільки великою, що не призведе до зростання пік-фактору.

До недоліків відноситься також відсутність інформації про вид дефекту, оскільки ударні імпульси з'являються при різних видах дефектів. Це не дозволяє давати довгостроковий прогноз стану машини, тому що індивідуальні дефекти мають різні швидкості розвитку. Таким чином, метод ударних імпульсів може бути використаний тільки для контролю стану вузла, але не для його діагностування.

Аналіз траєкторії руху, наприклад, аналіз траєкторії переміщення осі валу, що обертається у власних підшипниках, - черговий метод вібродіагностики. Для зняття характеристик та аналізу траєкторії використовується тільки параметр вібропереміщення. Для побудови траєкторії руху ротора синхронно визначаються значення переміщень у горизонтальному та вертикальному напрямках (одночасно), потім виконується оцінка складових вібрації за частотою обертання. Траєкторія руху валу в підшипнику може мати форму кола, або форму еліпса. У найпростішому випадку форма траєкторії у вигляді простого еліпса свідчить про зсув фаз коливань валу, характерному для дисбалансу ротора. При побудові траєкторії руху валу можна розглядати часові сигнали не тільки на частоті обертання, а й суму компонентів – першу, другу тощо. У результаті виходять складні орбіти руху валу, що несуть інформацію про дефекти агрегату (рис.2.6).

Недоліком методу є необхідність використання дорогих двохканальних віброаналізаторів.

Як обладнання для вібраційної діагностики може бути успішно використана серія переносних приладів, що забезпечують вирішення різних завдань вібраційного контролю, оцінки технічного стану та виконання робіт з ремонту та віброналадки машин та агрегатів. Найбільш зручними в експлуатації є малогабаритні вимірювачі вібрації (рис.2.7), які використовуються для оперативного контролю вібраційного стану машин та агрегатів різного призначення.

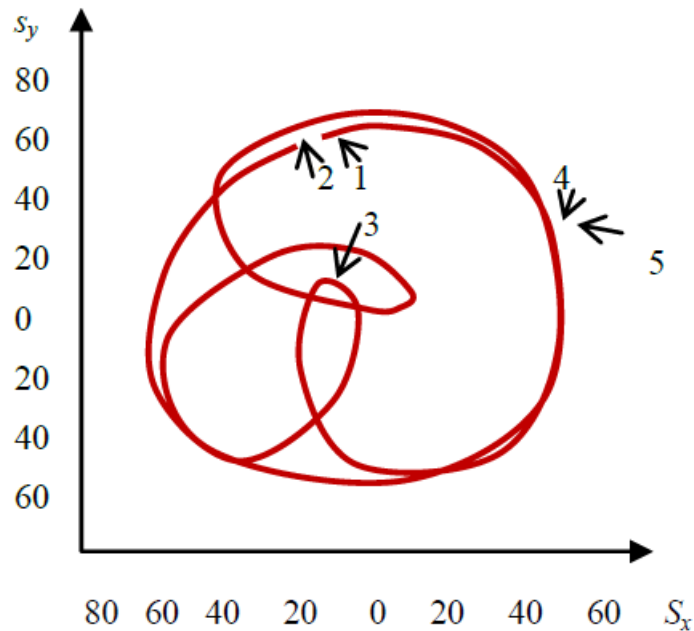


Рисунок 2.6 - Орбіта руху валу: 1 – момент початку обертання валу; 2 – завершення другого обігу; 3 – завершення одного обороту і початок наступного; 4 – завершення циклу обертання; 5 - початок наступного циклу обертання



Рисунок 2.7 - Малогабаритні вимірювачі вібрації: А – мережний адаптер (зарядний пристрій); Б - акумуляторна батарея; П – прилад; Д – датчик вібрації; С – стробоскоп; О – оптичний датчик; Ш – настановна шпилька з магнітним утримувачем

За допомогою приладу можливо провести спектральний аналіз параметрів вібрації, частоти обертання ротора, напруги змінного та постійного струму в процесі експлуатації, при налагодженні, ремонтах і технічному обслуговуванні обладнання.

Тепловий контроль – універсальний, точний, оперативний, високопродуктивний спосіб неруйнівного контролю, який дає можливість взаємодоповнюючого поєднання теплового методу з іншими видами неруйнівного контролю, а також можливість поточного контролю та створення автоматизованих систем контролю та управління технологічними процесами. Крім того, теплові методи поєднуються зі стандартними системами опрацювання інформації [14].

Методи теплового контролю засновані на взаємодії теплового поля об'єкта з термодинамічних чутливих елементів (термопарою, фотоприймачем, рідкокристалічним індикатором тощо) перетворенні параметрів поля (інтенсивності, температурного градієнта, контрасту, променистості та ін.) в електричний сигнал та передачі його на реєструючий прилад.

Існує кілька класифікацій теплового методу неруйнівного контролю. Наприклад, за параметрами теплового поля в об'єкті розрізняють пасивний та активний тепловий контроль, а за іншою класифікацією виділяють тепловізійний контроль; контроль теплопровідності; контроль температури; контроль густини теплових потоків.

Використання теплового методу допускає його комбіноване застосування з іншими методами контролю, що не руйнує. Додання теплового контролю іншими методами неруйнівного контролю, як правило, має сенс, коли тепловий контроль є методом, що передуює використанню більш ефективних засобів неруйнівного контролю або коли синтез різними методами контролю дає точніші результати.

Комбінування першого типу можливе, наприклад, при виявленні води в авіаційних стільникових панелях, а також ударних ушкоджень і розшарування в композитних матеріалах. У цих випадках за допомогою теплового контролю

локалізуються потенційно дефектні зони, після чого більш ретельний контроль може бути виконаний з використанням ультразвукового контролю. Аналогічним чином можуть контролюватись заклепувальні з'єднання авіаційних панелей, де основний контроль зазвичай проводиться вихрострумовим методом.

Комбінування другого типу, як правило, застосовується для контролю складних об'єктів, коли результат синтезу даних є не простим підсумовуванням окремих результатів, а створює їх нову якість, так називають ефект синергії. Крім більш точних результатів, таке комбінування дозволяє суттєво знизити тимчасові та фінансові витрати порівняно з послідовним застосуванням кількох методів.

За результатами аналізу виявлено, що метод вібродіагностики здатний виявляти лише механічні дефекти механізмів, що в результаті не дає повної картини про його технічний стан, але досить точно діагностує механічний дефект. За допомогою теплового методу можна проводити діагностику механічних та електричних частин механізму двигуна, але отримати достатню точність діагнозу вдається лише із застосуванням відносно дорогого обладнання. Актуальність застосування даних методів у галузі ремонту та технічного обслуговування герметичних компресорів полягає в тому, що немає необхідності порушувати цілісність діагностування.

Виявлено, що застосування даних методів можливе лише за умови повної або часткової працездатності об'єкта – це є суттєвим недоліком.

Загалом варто зробити висновок про те, що застосування методів окремо один від одного в області ремонту герметичних компресорів є не доцільним. Діагностування одночасно двома методами однозначно опише точну картину про об'єкти, що досліджуються.

2.3. Інформаційні ознаки пошкодження обмотки статора для побудови релейного захисту

При експлуатації асинхронного генератора (АГ) під впливом різних факторів знижується електрична міцність ізоляції обмотки, що може призвести

до її ушкодження. Відомо, що у більшості випадків (85-95%) відмови асинхронних машин відбуваються через пошкодження обмотки статора. При цьому понад 90% пошкоджень припадає на міжвиткові замикання [12]. На даний момент чутливих захистів АГ не існує, оскільки існує думка, що у випадку коротких замикань АГ втрачає збудження, і захист для нього не потрібний.

Для аналізу несиметрії струмів та напруги АГ у разі виткових КЗ введемо поняття коефіцієнта зворотної послідовності струмів K_2 :

$$K_2 = \frac{I_2}{I_1},$$

де: I_2 - струм зворотної послідовності; I_1 - струм прямої послідовності.

Також можна записати наступний вираз:

$$K_2 = \frac{\sqrt{2} \sqrt{(I_A - I_C)^2 + (I_C - I_B)^2 + (I_B - I_A)^2}}{I_A + I_B + I_C},$$

де: I_A, I_B, I_C – відповідно значення струмів фаз "А", "В", "С".

На рис.2.8 показані криві зміни струмів КЗ генератора з приводом при $n = \text{const}$ (I_{k31}) та $n = \text{var}$ (I_{k32}) від відсоткового співвідношення числа замкнутих витків до витків у фазі (W)

$$W = \frac{W_{K3}}{W_{\text{обм}}},$$

Де: W_{K3} - число замкнутих витків; $W_{\text{обм}}$ - число витків у фазі.

На рис.2.9 показані криві зміни струмів генератора $I_{aг}$, $I_{bг}$, $I_{cг}$ в амперах (А) для фаз А, "В", "С" відповідно, а також струм короткого замикання I_{k3} у фазі "А" при активному навантаженні генератора 600Вт в залежності від числа витків, що замкнулися, по відношенню до кількості витків у фазі.

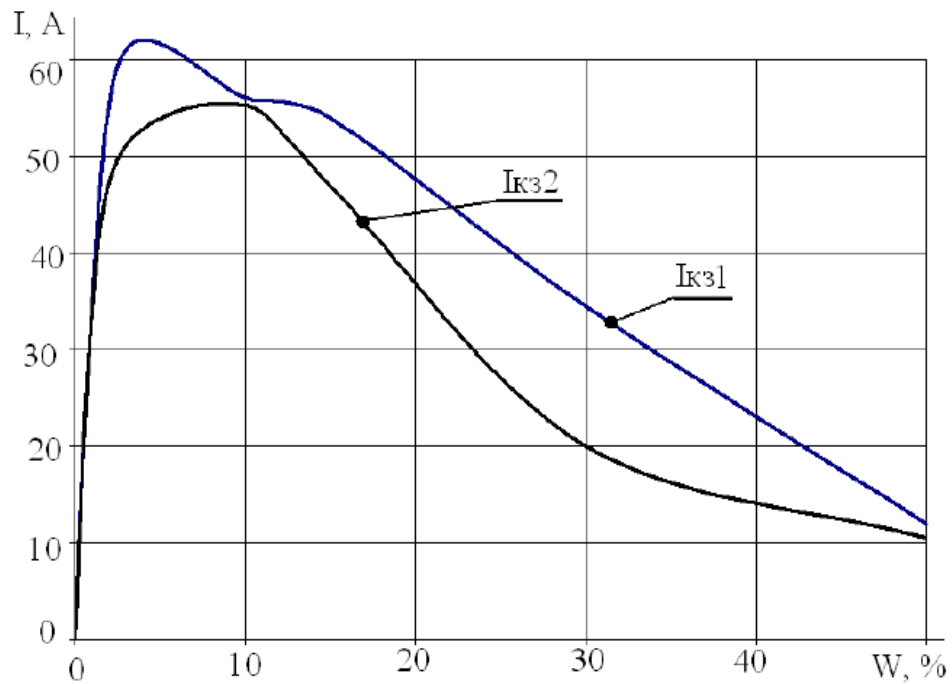


Рисунок 2.8 - Криві зміни струмів КЗ генератора

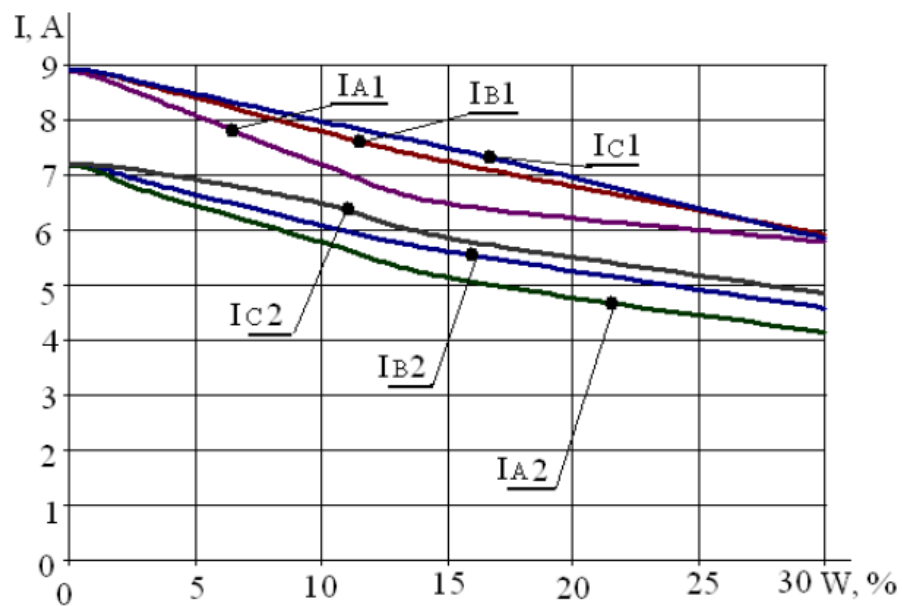


Рисунок 2.9 - Криві зміни фазних струмів генератора

При виткових та міжфазних КЗ в обмотці статора при малій кількості витків АГ, що замкнулися, не втрачає збудження. З отриманих даних видно, що струм у короткозамкненій частині обмотки збільшується у 5-10 разів у порівнянні з номінальним.

У разі 15 % КЗ витків фазні, ємнісні струми, напруги в ушкодженій фазі зменшуються в 1,3 рази ($\omega = \text{const}$ і чисто активне навантаження). Коефіцієнт зворотної послідовності для фазних, ємнісних струмів та фазної напруги має

величину менше 0,1. Різниця між середніми значеннями струмів та напруги фаз при 15% КЗ витків, і струмами та напругами в пошкодженій фазі, по відношенню до номінальних величина, буде відповідно $0,04 I_{\text{ном}}$ та $0,07 U_{\text{ном}}$. Струм навантаження в ушкодженій фазі у разі зменшується в 1,1 раза. Коефіцієнт зворотної послідовності має величину менше ніж 0,05.

Отже, великої несиметрії фазних струмів навантаження немає. Генератор втрачає збудження лише при 15–30 % замкнутих витків.

У разі міжфазних (двофазних та трифазних) КЗ в середині обмотки статора також відбувається зменшення відповідних величин. Струм КЗ у разі симетричного пошкодження більше, ніж при несиметричному ушкодженні.

Аналогічний характер має зміну гармонійних складових у неушкоджених фазах. Зміна гармонійних складових струмів і напруги у разі міжфазних та трифазних несиметричних КЗ аналогічно до зміни при виткових КЗ. При симетричному трифазному КЗ спостерігається зростання першої гармоніки фазних та ємнісних струмів у 1,25 разів. Третя, п'ята та сьома гармоніки зменшуються у 2,8, 1,5 та 1,1 разів. Аналогічні співвідношення отримані для фазної напруги, проте перша гармоніка зменшується, а третя зростає. Гармонійні складові для струмів навантаження зменшуються подібно до напруги, але в 1,4 разів менше.

Основним принципом виявлення виткових замикань в обмотці статора асинхронного електродвигуна є вимір несиметрії струмів статора, що з'являється. Встановлено, що у разі виткових КЗ несиметрія струмів і напруги не велика і можна порівняти з несиметрією в ланцюзі навантаження АГ. Це не дозволяє виконати захист, що реагує на цю несиметрію. Теж можна сказати і про зміну гармонійного спектру струмів та напруги.

Тому для побудови захисту необхідно застосовувати високочутливі схеми для виявлення трифазної несиметрії системи струмів і напруги, а також спотворення форми струмів та напруги, наприклад, шляхом гармонійного аналізу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

У даному розділі магістерської роботи було здійснено:

- розглянуті існуючі методи діагностування на прикладі електричних двигунів, визначені їх переваги та недоліки;
- можна дійти невтішного висновку про відсутність універсального способу діагностування електродвигунів. Кожен із розглянутих методів має свої плюси та недоліки. Тому необхідно вибирати спосіб діагностування, спираючись на тип експлуатованого механізму;
- метод вібродіагностики здатний виявляти лише механічні дефекти механізмів, що в результаті не дає повної картини про його технічний стан, але досить точно діагностує механічний дефект. За допомогою теплового методу можна проводити діагностику механічних та електричних частин механізму двигуна, але отримати достатню точність діагнозу вдається лише із застосуванням відносно дорогого обладнання;
- актуальність застосування даних методів у галузі ремонту та технічного обслуговування герметичних компресорів полягає в тому, що немає необхідності порушувати цілісність діагностування;
- виявлено, що застосування даних методів можливе лише за умови повної або часткової працездатності об'єкта – це є суттєвим недоліком;
- загалом варто зробити висновок про те, що застосування методів окремо один від одного в області ремонту герметичних компресорів є не доцільним. Діагностування одночасно двома методами однозначно опише точну картину про об'єкти, що досліджуються.

РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

3.1. Аналіз методів діагностування електродвигунів постійного струму

В останні роки відбувається витіснення традиційних регульованих електроприводів на базі двигунів постійного струму (ДПС) асинхронними електроприводами. Тим не менш, ДПС продовжують випускатися та активно експлуатуватися, особливо в металургійної промисловості.

Тому для вирішення проблеми надійної експлуатації необхідно впроваджувати різні способи та засоби контролю стану електроустаткування.

Особлива увага приділяється розробці та впровадженню інтелектуальних систем діагностування [16], заходам, пов'язаним із здійсненням контролю під час роботи або використанням спеціалізованих систем діагностування ДПС для виявлення дефектів на ранній стадії та оцінкою технічного стану об'єкта, що досліджується. При цьому з'являється можливість прогнозування оптимальних термінів проведення технічних обслуговувань, що дозволяє підвищити ресурсоефективність експлуатації за рахунок зниження трудовитрат, витрат запасних частин та простоїв.

У двигунах постійного струму велику інформаційну ємність має щітково-колекторний пристрій. Цей пристрій є джерелом акустичних сигналів, електромагнітних хвиль надвисокочастотного, інфрачервоного та оптичного діапазонів. Крім цього, стан щітково-колекторного пристрою надає значний вплив на форму споживаного струму якоря.

У цьому розділі пропонується розглянути спосіб діагностування ДПС за допомогою аналізу комутаційних процесів щітково-колекторного пристрою. У існуючих умовах найбільш важливим є зниження ймовірності виникнення аварій ДПС, що тягнуть за собою зупинку виробництва. Рішення цього завдання можна домогтися, забезпечивши своєчасне виявлення значних дефектів двигуна.

Стаціонарні системи моніторингу та діагностики найбільш ефективні для об'єктів з однотипними електроприводами, що мають постійне навантаження і

швидкість обертання – вентиляторних, компресорних та, особливо, насосних станцій.

Аналіз діагностичних систем, що серійно випускаються показав, що в даний час немає готових систем, які повністю задовольняють вимогам промислових підприємств з погляду вартості та адаптованості до виробничих умов. Система вібродіагностики повинна бути максимально спеціалізована для конкретних машин та обладнання, мати можливість не тільки видавати діагноз у явному вигляді, прогнозувати зміну технічного стану машин, а й давати рекомендації щодо вигляду та термінів ТО та Р, розраховувати оптимальні терміни наступних діагностичних обстежень.

Для вирішення поставленого завдання (діагностування ДПС та контролю його технічного стану) слід розглядати можливість використання подібних систем для аналізу струмових сигналів з ДПС, а також з детекторів високочастотного випромінювання щітково-колекторного пристрою.

Діагностика струму електродвигуна заснована на застосуванні сучасних апаратно-програмних пристроїв, що дозволяють створити систему моніторингу стану електродвигуна на основі обробки струмових діаграм та аналізу спектрів із застосуванням сучасних математичних методів. Під моніторингом стану по споживаному струму розуміється періодичний або безперервний вимір величин змінних складових у спектрі струму, що відповідають за конкретні дефекти в приводному двигуні та навантаженому на нього механізмі з подальшим аналізом їх змін у процесі експлуатації.

Розробку найпростішої стаціонарної системи почали виконувати на основі вимірювача діагностичних сигналів (мережевого вимірювача). Його ж разом із програмою запису вимірюваних сигналів використовували для проведення багатоканальних спільних вимірювань вібрації та струму в рамках попередніх досліджень споживаного агрегатами з електроприводом струму. На рис.3.1 наведені фото мережевого вимірювача [17].

Основними недоліками даного методу є необхідність урахування впливу на електричні параметри двигуна параметрів мережі живлення, характеру

навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів у двигуні, складність обробки даних.



Рисунок 3.1 - Мережеві вимірювачі з комп'ютером та встановленою технологічною програмою

1. Аналіз відомих методів діагностування двигунів постійного струму показує наявність у них певних переваг та недоліків. У кожному із випадків їх застосування необхідно виходити з технічних умов їх реалізації та зіставлення техніко-економічних показників.

2. Пропонований метод, заснований на вимірі іскріння в щітково-колекторному пристрої як джерела електромагнітних хвиль, є перспективним з погляду простоти знімання сигналу. Безумовно, питання їхньої подальшої обробки та застосування програмно-технічних засобів залишаються відкритими і вимагають додаткових досліджень.

3.2. Методика діагностики та ідентифікації дефектів обмоток асинхронного двигуна у режимі його функціонування

Відомі методи та засоби діагностики технічного про стан АД, засновані на вимірі величин або струмів, або температури, або вібрації, або акустичних характеристик електричних машин. Наприклад, методика діагностики, заснована на безперервному контролі температури конкретної точки обмотки статора, порівняння її з температурою довкілля, визначення перевищення температури над навколишнім середовищем та вироблення сигналу на відключення двигуна від джерела електроживлення. Однак ця методика не

ідентифікує причину перегріву обмотки, тобто не розрізняє через який фактор обмотка перегрівається: через технологічне навантаження, через виткові замикання або обрив фаз обмотки статора (ротора) або через знос підшипників, чи інших причин. Відома також методика, заснована на вимірюванні фазних струмів та його спектрального аналізу, що дозволяє діагностувати підшипникові вузли.

Ідентифікувати несправності обмоток статора (ротора) дозволяє методика, заснована на реєстрації струмів АД і дослідженні їх спектру з застосуванням вейвлет-перетворень [15]. Відома методика оцінки параметрів АД шляхом непрямого вимірювання опору обмотки статора в режимі функціонування, заснована на формуванні сигналу, пропорційна падінню напруги в міді обмотки статора. Проте ця методика дозволяє контролювати вимірювання опору у функції температури і не дозволяє діагностувати вигляд несправності обмоток АД. Відомі методика та прилад для контролю енергетичних характеристик асинхронних електроприводів у режимі їх функціонування [10]. Однак вони не виділяють несправності електромагнітної системи АД.

Наведені методики діагностування АД за струмами, що споживаються, засновані на застосуванні спеціальних комп'ютерних програм і вимагають достатньо складного математичного забезпечення.

У цій роботі дається наукове обґрунтування методики діагностування розвитку та ідентифікації несправностей обмоток АД, заснований на реєстрації реальної фазної напруги живлення, споживаних струмів і моделювання на їх основі результатів магнітного поля двигуна, що обертається, а також його енергетичних характеристик і подальшого їх порівняння з магнітним полем, що обертається, і енергетичними характеристиками двигуна із свідомо справними та несправними обмотками за ознаками, що визначають спотворення магнітного поля, що обертається, з ідентифікаторами несправностей обмоток.

Завдання вирішується методом математичної моделювання результуючого магнітного поля, що обертається, і його складових за

величинами фазних струмів статора, струмів намагнічування та струмів ротора, а також фазних потужностей, величин ККД та $\cos \varphi$ асинхронного двигуна, який працює в симетричному і несиметричному режимах.

В обмотці протікають однакові по модулю, але зрушені по початковій фазі, на 120° струми:

$$\dot{I}_1 = I_1 \cdot e^{j(\psi_1 - \psi_2)};$$

$$\dot{I}_2 = I_2 \cdot e^{j(\psi_1 - \psi_2 - 120^\circ)};$$

$$\dot{I}_3 = I_3 \cdot e^{j(\psi_1 - \psi_2 + 120^\circ)}.$$

При порушенні симетрії джерела живлення або з симетрії параметрів обмоток АД, тобто при $Z_{e1j} = Z_{e2j} = Z_{e3}$, що має місце при несправностях електромагнітної системи, трифазна система струмів статора стає несиметричною, а кругове магнітне поле статора, що обертається, спотворюється в еліпсоїдне поле, що обертається, яке характеризується координатами – великим і маленьким діаметрами та кутом нахилу осі великого діаметра щодо речовинної осі комплексної площини.

Ідея пропонованого методу діагностування та ідентифікації несправностей обмоток АД заснована на формуванні годографа вектора обертового магнітного поля та його координат, отриманих методом моделювання за реальними фазними струмами, та порівняно з годографами векторів магнітних полів, що обертаються, їх координат і енергетичних показників свідомо справного АД і цього ж двигуна з тестованими несправностями, що моделюються, число яких $N = 2^k$, де $k = 2^A$; A – число аргументів, що визначають місце та вид несправності обмотки.

Обґрунтування методики діагностування несправностей обмоток АД ґрунтується на аналізі параметрів електричної Т-подібної схеми заміщення (рис.3.2), та їх зв'язки з реальними параметрами обмоток статора, ротора та параметрами магнітної системи електричної машини.

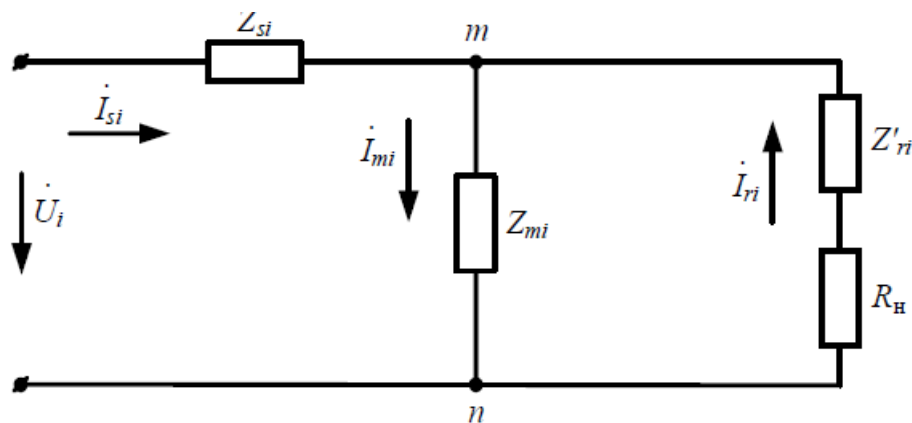


Рисунок 3.2 - Т-подібна схема заміщення і-ої фази АД

На рис. 3.2 наведені позначення:

U_i - напруга і-ї фази джерела живлення; $Z_s = k_{si} R_{s1} + j \cdot k_{si}^2 X_{m1}$ - комплексний опір фази обмотки статора; $Z_{mi} = k_{mi} R_{mi} + j k_{si} X_{mi}$ - комплексний опір фази гілки намагнічування (головний опір двигуна); $Z'_{ri} = k_{ri} R'_{r2} + j X'_{r2}$ - комплексний опір фази обмотки ротора, приведений до обмотки статора; $R_{ni} = R'_{r2} \cdot (1/s_i - 1)$ - активний опір, пропорційний механічному навантаженню АД, s_i - ковзання АД; k_{si} , k_{ri} , k_{mi} - коефіцієнти, що характеризують несправності, відповідно в обмотках статора, ротора та гілки намагнічування.

Встановимо зв'язки між величинами опорів схеми заміщення з реальними фізичними параметрами обмотки статора з урахуванням можливих її несправностей. Активний опір R_1 фази в Ом справної обмотки визначається відомим співвідношенням [11]:

$$R_1 = w_1 \cdot \frac{l_{1cp}}{\gamma_\theta \cdot a_1 \cdot c_1 \cdot q \cdot 10^3},$$

де w_1 - число ефективних витків фази обмотки статора; l_{1cp} - середня довжина витка, мм; γ_θ - питома провідність матеріалу провідника (міді) при робочій температурі θ , см/мкм; a_1 - число паралельних гілок обмотки статора; c_1 - кількість елементарних провідників; q - площа поперечного розтину елементарного провідника.

Питома провідність матеріалу провідника (міді) в Ом при роботі Θ визначається за відомою формулою:

$$\frac{1}{\gamma_v} = \frac{1}{\gamma_{20}} \cdot [1 + \alpha \cdot (\Theta - 20^\circ\text{C})],$$

де: γ_{20} – питома електрична провідність матеріалу провідника при 20°C , См/мкм; α - температурний коефіцієнт опору, $^\circ\text{C}^{-1}$, для міді та алюмінію $\alpha=0,004^\circ\text{C}^{-1}$; Θ - температура обмотки АД.

З виразу (3.) видно, що активний опір R_1 фази статора обмотки залежить від електричної провідності матеріалу, з якого виготовлена обмотка, числа ефективних витків, середньої довжини витка, числа елементарних провідників в одному ефективному провіднику, числа паралельних гілок та від температури АД. При виткових замиканнях обмотки активний опір R_1 зменшується, а при обриві елементарних провідників чи паралельних гілок – збільшується. При математичному моделюванні тестових несправностей ці ознаки пошкоджень обмотки статора враховуються коефіцієнтом:

$$k_{si} = \frac{k_{w_i}}{k_{c_i} \cdot k_{a_i}},$$

$$k_{w_i} = \left(1 - \frac{w_{1i}}{w_1}\right), \quad k_{c_i} = \left(1 - \frac{c_{1i}}{c_1}\right), \quad k_{a_i} = \left(1 - \frac{a_{1i}}{a_1}\right);$$

де: w_{1i} – число коротко замкнутих витків обмотки статора; c_{1i} – число розімкнених (обриваних) елементарних провідників; a_{1i} – число розімкнених паралельних гілок.

При вирішенні поставленого завдання, використовуючи вираз (3.), можна моделювати тестові короткі замикання витків, обриви елементарних провідників та паралельних гілок обмотки статора. Тому при моделюванні несправностей обмоток статора активний опір обмотки змінюється за формулою:

$$R_{si} = k_{si} \cdot R_1.$$

Індуктивний опір справної обмотки статора X_1 Ом, обумовлений потоками розсіювання магнітного поля, визначається відомим співвідношенням:

$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot w_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8},$$

де f_1 - частота струму, Гц; l_1 – довжина сердечника статора, мм; w_1 – кількість ефективних витків фази обмотки статора; p – кількість пар полюсів АД; q_1 – кількість пазів на полюс та фазу; λ_1 – коефіцієнт провідності розсіювання обмотки статора, для АД середньої та великої потужності $\lambda_1=3,5 \div 4,3$.

З урахуванням викладеного, комплексний опір i -ї фази обмотки статора в Ом, при моделюванні несправностей обмотки, представляється векторною сумою:

$$Z_{si} = k_{si} \cdot R_1 + jk_{wi}^2 \cdot X_1,$$

де: R_1, X_1 – параметри обмотки статора, що визначаються за каталожними даними або з довідників для АД.

При вирішенні поставленого завдання величина головного індуктивного опору i -ї фази АД (Ом) визначається як:

$$X_{mi} = k_{wi} \cdot X_m,$$

де X_m - знаходиться за довідниковими даними досліджуваного АД.

Комплекс головного опору, Z_m , двигуна містить речову складову R_m . Ця величина пропорційна магнітним втратам в електротехнічній сталі - втратам активної потужності у феромагнітному сердечнику статора. При моделюванні результуючого магнітного поля враховується, що при реальному холостому ході двигун долає механічну потужність тертя у підшипниках і потужність, що витрачається на вентиляцію. З досвіду експлуатації АД механічна потужність реального холостого ходу знаходиться в діапазоні $(0,005 \div 0,009) \cdot P_{2H}$.

Тобто, розв'язання задачі здійснюється за алгоритмом:

1. Задаються вихідні дані двигуна та оцифровані сигнали інструментально зареєстровані значення фазних напруги і струмів.
2. Обчислюються параметри Т-подібної схеми заміщення АД.
3. Задаються коефіцієнти, що характеризують несправності обмоток АД.
4. Для заданих несправностей обмоток вираховуються струми гілок електричної схеми, перевіряються закони Кірхгофа, баланс потужності, визначаються значення фазних струмів, потужності, ККД, $\cos\phi$; створюється таблиця тестових даних.
5. Формуються годографи векторів результуючих магнітних полів двигуна, що обертаються, і складаються серії енергетичних даних (координати головних осей годографа, діючі значення фазних струмів, потужності, ККД, $\cos\phi$).
6. Формується результуюче обертове магнітне поле та енергетичні параметри двигуна по інструментально зареєстрованим фазним струмам.
7. Здійснюється порівняння параметрів реального результуючого магнітного поля, що обертається, та енергетичних характеристик з параметрами обертових магнітних полів і енергетичних характеристик, отриманих моделюванням для заданих несправностей обмоток АД.
8. Визначаються збігаючи ознаки параметрів несправностей реальної обмотки АД з параметрами, отриманими методом моделювання, та ідентифікується номер комбінації несправностей.

За допомогою розробленої методики та програмного комплексу при заданих $\Delta w_1=0,25$, $\Delta c_1=1$, $\Delta a_1=1$, $\Delta w_2=1$, $\Delta c_2=1$, $\Delta a_2=1$ змодельовані годограф вектору магнітного поля, що обертається, справного двигуна (рис. 3.3, суцільна лінія) і годограф вектору обертаючого магнітного поля, сформованого по осцилограмам (рис.3.3, пунктирна лінія).

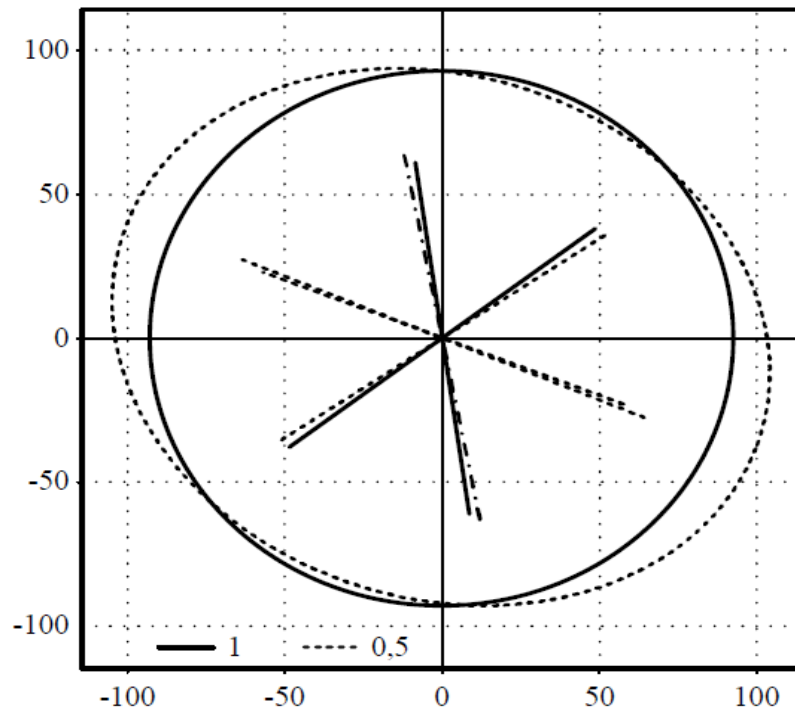


Рисунок 3.3 - Годографи обертових магнітних полів: для справного та для двигуна, що випробується

Слід відзначити, що у результаті роботи можна зробити такі висновки:

1. Розроблено методику діагностування та ідентифікації несправностей обмоток АД в режимі нормального функціонування, заснована на побудові годографів векторів обертових магнітних полів і моделювання енергетичних характеристик двигуна, що працює в симетричних та несиметричних режимах.
2. Розроблено алгоритм та програмний комплекс, що реалізують методику діагностування та ідентифікації несправностей обмоток АД.
3. Методика та програмний комплекс дозволяють діагностувати та ідентифікувати несправності обмоток АД з точністю не нижче 86,6%.
4. Методика та програмний комплекс рекомендуються до застосування у службах головного енергетика, електрикам цехів промислових підприємств для періодичного моніторингу асинхронних електроприводів.

3.3. Розробка ієрархічних функціональних моделей процесу діагностування асинхронних двигунів з використанням методології IDEFO

В даний час розроблено велику кількість методів моделювання, використання яких крім вирішення основних функціональних завдань дає

накопичення досвіду та практичні навички персоналу в ході експлуатації об'єкта, а також дозволяє уніфікувати створені моделі для взаємодії між групами розробників та споживачів [17]. Найважливішими з таких підходів є:

1) функціональний (методологія IDEF0 (діаграми IDEF0)). Головною особливістю даного підходу є принцип декомпозиції діаграм, тобто чітке структурування, побудова ієрархічних та взаємопов'язаних діаграм;

2) об'єктно-орієнтований (діаграми UML). Цей підхід використовує об'єктну декомпозицію, при цьому статична структура системи описується в термінах об'єктів та зв'язків між ними, а поведінка системи описується у термінах обміну повідомленнями між об'єктами.

Розробка повних та несуперечливих ієрархічних функціональних моделей процесу діагностування АД здійснюється з використанням методології IDEF0, що дозволяє докладно описувати його шляхом введення рівнів деталізації. При цьому спрощується не лише моделювання процесу діагностування, а й розуміння моделей через видачу інформації невеликими частинами на кожній наступній діаграмі [17]. Це дозволяє усунути неоднозначність опису, що виникає з постановок завдань, пов'язаних з діагностуванням АД.

Як управління (регламентування, обмеження) виступають нормативні вимоги (ДОСТи), де зазначені умови експлуатації, допустимі відхилення від номінальних значень основних параметрів АД, основні КПЕ тощо, а як механізм – оперативний персонал, особа, яка приймає рішення.

Далі на основі принципу ієрархічного впорядкування з урахуванням завдань, які будуть детально розглядатися надалі, деталізується контекстна діаграма. Зазначимо, що піддавати декомпозиції функції моделей, представлених на діаграмах можна до необхідного рівня.

У цій роботі як модель представлення знань пропонується використовувати продукційні правила. Структура продукційного правила буває кількох типів, так як залежить від кількості вхідних змінних в умовах, і кількості вихідних змінних у висновках [18]:

1) структура з одним входом та одним виходом (Single Input – Single Output (SISO));

2) структура з багатьма входами та одним виходом (Multi Inputs – Single Output (MISO));

3) структура з багатьма входами та багатьма виходами (Multi Inputs – Multi Outputs (MIMO)).

Оскільки в даному випадку на ТЗ АД впливають безліч груп параметрів, факторів (вхідні змінні), а як вихід виступає єдине рішення (вихідна змінна), то для розробки продукційних правил застосовується MISO-структура (рис.3.4).

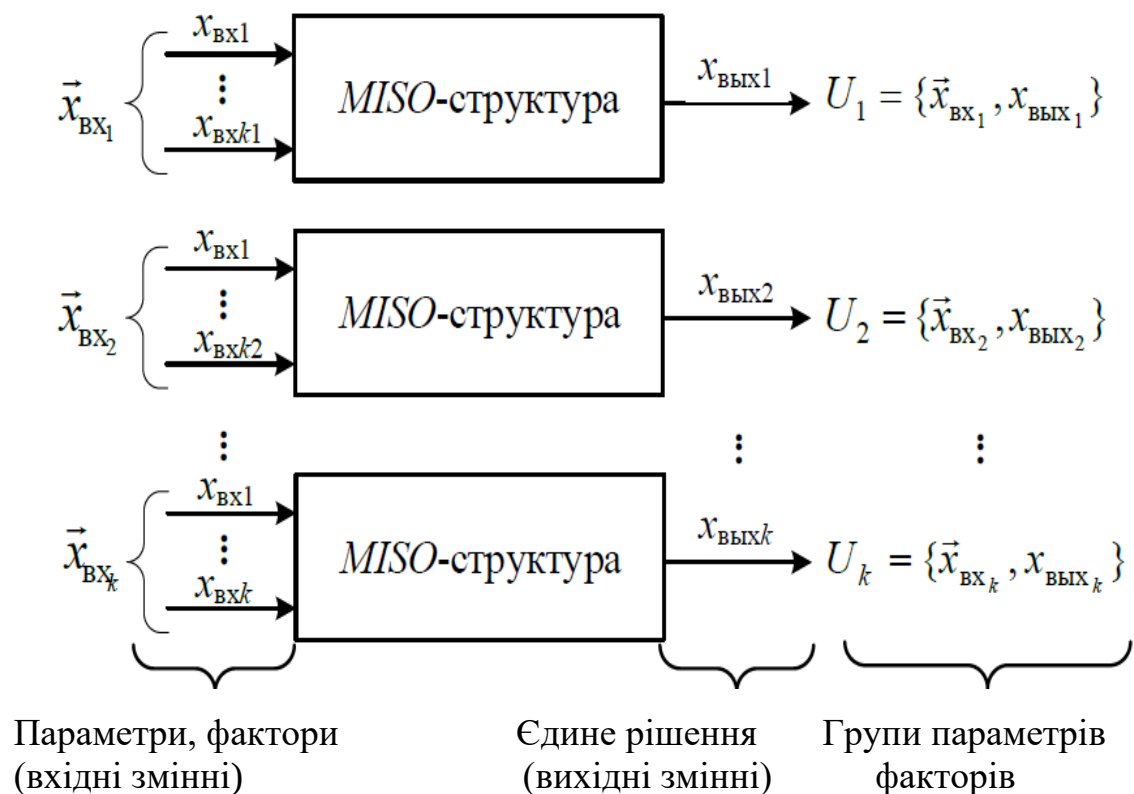


Рисунок 3.4 - MISO-структура для розробки продукційних правил

Під неоднорідною когнітивною моделлю (НКМ) розуміється орієнтований зважений граф, вершинами якого є ПКЕ та фактори, що впливають на роботу АД, а ребрами – нечіткі причинно-наслідкові зв'язки між параметрами та факторами [18]. При цьому значення вершин можуть не лише визначатися на основі досвіду оперативного персоналу, вимірювальних

приладів, але й обчислюватися за допомогою функцій, які зіставлені вершинам і можуть залежати як від єдиного аргументу (від однієї вершини), так і від кількох змінних (кілька вершин), (рис.3.5).

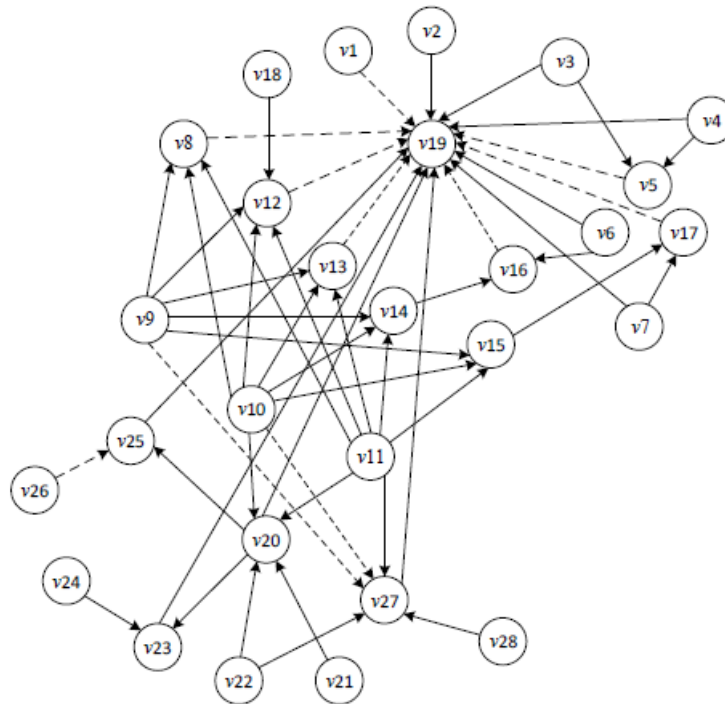


Рисунок 3.5 – Неоднорідна когнітивна модель діагностування

Неоднорідна когнітивна модель представлена на рис.3.5, складається з наступних 28 вершин:

1) ПKE: X_1 – відхилення частоти, Δf , Гц; X_2 – тривалість провалу напруги, Δt_n , с; X_3 – коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю, K_{2U} , %; X_4 – коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю, K_{0U} , %; X_5 – несиметрія напруги; X_6 – доза флікера, P_{st} ; X_7 – коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги, $K_{U(n)}$, %; X_8 – коефіцієнт тимчасової перенапруги; X_9 – напруги фази 3, U_C , В; V_{10} – напруги фази А, U_A , В; X_{11} – напруги фази, U_B , В; X_{12} – грозові імпульсні напруги, U_{imp} , В; X_{13} – відхилення напруги на фазах А, В, С, δU_v , %; X_{14} – розмах зміни напруги, U_t , %; X_{15} – коефіцієнт спотворення синусоїдальної форми кривої напруги, K_U , %; X_{16} – коливання напруги; X_{17} – несинусоїдальність напруги), $K_{НС}$;

2) діагностичні фактори: X_{18} – кліматичні умови; X_{19} – справність технічного стану АД;

3) основні діагностичні параметри: X_{20} – потужність споживання з мережі, Р₁, кВт; X_{21} – коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$; X_{22} – струм статора, I₁, А; X_{23} – коефіцієнт корисної дії, η ; X_{24} – номінальна потужність, Р₂, кВт; X_{25} – момент на валу, М₂, Нм; X_{26} – частота обертання, n; X_{27} – ковзання, s; X_{28} – опір статорної обмотки, r₂, Ом.

Фрагмент матриці відносин НКМ представлений у вигляді табл.3.1.

Таблиця 3.1 - Фрагмент матриці відносин НКМ

	v_1	v_2	...	v_{11}	v_{12}	...	v_{18}	v_{19}	...	v_{20}	v_{28}
v_1	0	0	...	0	0	...	0	-0,3	...	0	0
v_2	0	0	...	0	0	...	0	-0,7	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
v_{11}	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0,7	0
v_{12}	0	0	...	0	0	...	0	-0,5	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
v_{18}	0	0	...	0	0,7	...	0	0	...	0	0
v_{19}	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
v_{20}	0	0	...	0	0	...	0	0,7	...	0	0
v_{28}	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0	0

Зазначимо, що для визначення зв'язків між параметрами та факторами, що впливають на роботу АД, було проведено збір та аналіз знань оперативного персоналу в області діагностування АД. Для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між параметрами та факторами (вершинами) визначено шкалу для оцінки їх характеру (позитивний або негативний) та сили зв'язків.

Під коригуванням НКМ розуміється додавання чи видалення вершин; встановлення нових зв'язків між вершинами; зміна значень вершин.

Після побудови НКМ проводиться обчислювальний експеримент, який включає наступні системні завдання: аналіз структури НКМ (аналіз циклів моделі, пошук власних чисел, аналіз стійкості процесу, аналіз структурної стійкості до збурювальних та керуючих впливів, топологічний аналіз структури моделі, розрахунок системних показників НКМ (вплив факторів один на

одного)), а також імпульсне моделювання та сценарний аналіз для прогнозування АД.

Результати обчислювального експерименту для ЕД серії ВАО5К-450-315-2 представлені у роботі так:

Функція А5 - Аналіз результатів діагностування. Ця функція дозволяє проводити аналіз одержаних результатів діагностування ЕД. Якщо результати діагностування ЕД у ЛПР викликають сумніви, він доручає персоналу завдання, наприклад, підкорегувати НКМ чи продукційні правила.

Функція А6 – Розробка рекомендацій та прийняття діагностичних рішень. Ця функція дозволяє розробляти рекомендації та приймати діагностичні рішення з урахуванням виявлених несправностей під час роботи ЕД.

У процесі розробки БЗ формується величезна кількість продукційних правил, причому БЗ виявляється надмірною, що ускладнює роботу оперативного персоналу з інтерпретації результатів.

Наприклад, у задачі, яка вирішується, БЗ містила би $N = 3^{11} \cdot 2^{17} \cdot 1^5 = 242\,683$ правил, оскільки на вхід подається 11 параметрів, кожен з яких містить однакову кількість термів, рівних трьом, і 17 параметрів - число термів, що дорівнює двом. За такої величезної кількості правил процедура перевірки несуперечності правил та коректності роботи системи стає нездійсненною взагалі. Тому кількість продукційних правил, з якими працюють реальні інтелектуальні системи, не перевищує однієї тисячі.

Для вирішення цієї проблеми оперативному персоналу було запропоновано скласти продукційні правила на основі свого досвіду та знань, що описують всілякі ситуації, що можуть виникнути під час експлуатації АЕ серії ВАО5К-450. В результаті було отримано 237 ієрархічних продукційних правил, на основі яких було побудовано НКМ (рис.3.5.), яка досліджувалась із застосуванням обчислювального експерименту (табл.3.2).

Таблиця 3.2 - Результати зіставлення значень, отриманих з/без застосування розробленого програмного забезпечення

№	Найменування фактору	Без використання ПС	З використанням ПС
1	Час використання АД (день)	14	9
2	Кількість виконавців, що приймають участь у діагностуванні ЕД (люди)	6	3

Для автоматизованої побудови продукційних правил та роботи з ними було розроблено програмну систему (ПС).

У табл.3.2 наведено результати зіставлення значень, отриманих з/без застосування розробленої ПС при діагностуванні ЕД машинобудівного виробництва.

У даному розділі роботи пропонується підхід до діагностування асинхронних електродвигунів на основі застосування ієрархічних функціональних моделей, побудованих з використанням методології IDEF0 для комплексного обліку впливу ПКЕ. Розроблені ієрархічні функціональні моделі представлені в наочній та доступній формі, тим самим показуючи, які функції необхідно виконати для діагностування АД. Виконання запропонованих функцій дозволяє виявляти на ранній стадії несправності, що виникають, запобігати аварійним ситуаціям, що призводять до серйозних негативних наслідків. При цьому моделі забезпечують можливість обміну інформацією про процес, що розглядається, з урахуванням нормованих вимог мовою, зрозумілою як оперативному персоналу, так і ЛПР.

Розроблена система ІПП, отримана в результаті ранжування правил, відображає узагальнені знання оперативного персоналу щодо роботи конкретного АД, що дозволяє зменшити обсяг БЗ, що містить продукційні правила, та прийняти науково обґрунтовані діагностичні рішення щодо справності конкретного АД.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Аналіз відомих методів діагностування двигунів постійного струму показує наявність у них певних переваг та недоліків. У кожному із випадків їх застосування необхідно виходити з технічних умов їх реалізації та зіставлення техніко-економічних показників.

Пропонований метод, заснований на вимірі іскріння в щітково-колекторному пристрої як джерела електромагнітних хвиль, є перспективним з погляду простоти знімання сигналу. Безумовно, питання їхньої подальшої обробки та застосування програмно-технічних засобів залишаються відкритими і вимагають додаткових досліджень.

Розроблено методику діагностування та ідентифікації несправностей обмоток АД в режимі нормального функціонування, заснована на побудові годографів векторів обертових магнітних полів і моделювання енергетичних характеристик двигуна, що працює в симетричних та несиметричних режимах.

Розроблено алгоритм та програмний комплекс, що реалізують методику діагностування та ідентифікації несправностей обмоток АД.

Методика та програмний комплекс дозволяють діагностувати та ідентифікувати несправності обмоток АД з точністю не нижче 86,6%.

Методика та програмний комплекс рекомендуються до застосування у службах головного енергетика, електрикам цехів промислових підприємств для періодичного моніторингу асинхронних електроприводів.

Розроблена система ІПП, отримана в результаті ранжування правил, відображає узагальнені знання оперативного персоналу щодо роботи конкретного АД, що дозволяє зменшити обсяг БЗ, що містить продукційні правила, та прийняти науково обґрунтовані діагностичні рішення щодо справності конкретного АД.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ:

У роботі було проаналізовано загальні відомості про основні дефекти електричних машин на прикладі електричних двигунів.

Зроблений огляд методів контролю технічного стану АД в процесі їх експлуатації.

Незважаючи на велику кількість методів діагностики електродвигунів, питання продовжує залишатися актуальним з низки причин. Серед них - відсутність надійних критеріїв оцінки технічного стану, динаміки розвитку дефектів, відсутність методів прогнозування залишкового ресурсу, недостатня дослідженість окремих пошкоджень двигунів, а також те, що не визначені спеціальні діагностичні параметри, що характеризують зміну процесів функціонування у разі виникнення відповідних дефектів. Наявні критерії враховують лише граничні або допустимі стани параметрів, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії розвитку.

Проблема діагностики асинхронних двигунів полягає у необхідності створення універсального, простого методу визначення технічного стану АД. Це дозволить до мінімуму знизити збитки від пошкоджень асинхронних двигунів за рахунок раннього виявлення виникаючих дефектів.

Бажаною умовою є вимірювання діагностичних параметрів функціонуючого приводу без виведення двигуна з процесу виробництва та транспортування його на спеціалізовані стенди. Винятком є діагностика після ремонту машин.

Можна дійти невтішного висновку про відсутність універсального способу діагностування електродвигунів. Кожен із розглянутих методів має свої плюси та недоліки. Тому необхідно вибирати спосіб діагностування, спираючись на тип експлуатованого механізму.

Метод вібродіагностики здатний виявляти лише механічні дефекти механізмів, що в результаті не дає повної картини про його технічний стан,

але досить точно діагностує механічний дефект. За допомогою теплового методу можна проводити діагностику механічних та електричних частин механізму двигуна, але отримати достатню точність діагнозу вдається лише із застосуванням відносно дорогого обладнання.

Виявлено, що застосування даних методів можливе лише за умови повної або часткової працездатності об'єкта – це є суттєвим недоліком.

Загалом варто зробити висновок про те, що застосування методів окремо один від одного в області ремонту герметичних компресорів є не доцільним. Діагностування одночасно двома методами однозначно опише точну картину про об'єкти, що досліджуються.

Розроблено алгоритм та програмний комплекс, що реалізують методику діагностування та ідентифікації несправностей обмоток АД.

Методика та програмний комплекс дозволяють діагностувати та ідентифікувати несправності обмоток АД з точністю не нижче 86,6%.

Методика та програмний комплекс рекомендуються до застосування у службах головного енергетика, електрикам цехів промислових підприємств для періодичного моніторингу асинхронних електроприводів.

Всі розробки, зроблені у цій роботі, направлені на підвищення енергетичної безпеки нашої України.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. Стандарти якості електропостачання та надання компенсації за їх недотримання. 2022. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diynosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya>
2. Державний стандарт України. Державна агенція з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://saee.gov.ua/documents/laws/Naka-56.doc>
3. Obaid R.R., Habelter T.G., Stack J.R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors // The 4th IEEE International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives, SDEMPED 2023. Proceedings. New Jersey. 2023. P. 182-187.
4. Silva J.L.H., Cardoso A.J.M. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach // The 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2015. P. 2591-2596.
5. Onel I.Y., Dalci K.B., Senol I. Detection of outer raceway bearing defects in small induction motors using stator current analysis // Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences. 2017. Vol. 30 (6). P. 713-722.
6. Bentley J.L. Multidimensional binary search trees used for associative searching // Communications of the ACM. 2018. Vol. 18 (9). P. 509-517.
7. Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. Classification and regression trees. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software. 2019. P. 368.
8. Cortes C., Vapnik V. Support-vector networks // Machine Learning. 2019. Vol. 20. P. 273-297.
9. Thorsen V., Dalva M. Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry / University of Cambridge. – 2017. – № 444. – С. 1–13.

10. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring / R.S. Randy, G.H. Thomas, F. Kamrah, G.B. Rodert // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Vol. 31, № 6. – P. 52–59.
11. William T.T., Fenger M. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults // IEEE Industry Application Magazine. – 2021. – № 7. – P. 23–29.
12. Kliman G.B., Stein J. Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring // ICEM'20: Proceedings of International Conferences, MIT. – Boston, 2020.
13. Єсаулов С.М. , Бабічева О.Ф., Рогожина Х.О. Дослідження, моделювання і проектування компонентів штучного нейромережевого модуля для дистанційної теплової діагностики електродвигунів. Комунальне господарство міст, 2019. Том 5, випуск 15. С. 13 – 20.
14. Єсаулов С. М. Проектування компонентів для систем автоматичного діагностування транспорту. / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, Н. П. Лукашова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Вып.5/3(41).– 2019. – С.28–32.
15. Єсаулов С. М. Контроль і моделювання параметрів для теплової діагностики порушень силового електрообладнання. / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, М. М. Ковалик/ Комунальне господарство міст. К. Техніка. Вип.3(149). – 2019. – С. 19 – 28.
16. Д'яконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 у математиці і моделюванні. : Солон-Р, 2023. 412 с.
17. Simulink. Model-Based and System-Based Design. Using Simulink. The Math Works, Inc. USA, 2022.
18. ДОСТ 7217-87. Машины электричні, що обертаються. Двигуни асинхронні. Методи випробувань.