

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Вільдеман Максим Анатолійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз методик діагностування та ідентифікації відмов в обмотках
асинхронного двигуна в режимі його функціонування
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Вільдеман М. А.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Островерхов Микола Якович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.т.н., професор кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Вільдеман . М. А Аналіз методик діагностування та ідентифікації відмов в обмотках асинхронного двигуна в режимі його функціонування

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою даної кваліфікаційної роботи є впровадження систем діагностики асинхронних двигунів в режимі їх функціонування.

Відповідно, ціллю роботи являється підвищити надійності, та виявлення проблем, що впливають на ефективність та безпеку роботи асинхронних електродвигунів.

Ключові слова: методика діагностування, ідентифікація відмов, асинхронний двигун.

ABSTRACT

Wildeman . M. A Analysis of methods for diagnosing and identifying failures in the windings of an induction motor in its operating mode

Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polessia National University, Zhytomyr, 2025.

The purpose of this qualification work is to implement systems for diagnosing induction motors in their operating mode.

Accordingly, the purpose of the work is to increase reliability and identify problems that affect the efficiency and safety of induction motors.

Keywords: diagnostic methods, failure identification, induction motor.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОПЕРАТИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ	8
1.1 Методи та засоби оперативної діагностики електромеханічних перетворювачів енергії	8
1.2 Діагностичні комплекси електромеханічних перетворювачів енергії	12
1.3 Стан та перспективи впровадження систем моніторингу та технічного діагностування електричних машин і апаратів	17
Висновки по розділу 1	27
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДІАГНОСТИКИ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ НЕСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В РЕЖИМІ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ	28
2.2 Аналіз методики струмової діагностики асинхронних двигунів за осцилограмами нестационарних режимів роботи	36
2.2 Спектральний аналіз струму статора трифазного асинхронного двигуна за аварійних режимів роботи	40
Висновки по розділу 2	36
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	41
Висновки по розділу 3	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56

ВСТУП

Як відомо, необхідною умовою беззбиткової роботи та ефективного функціонування в ринкових умовах будь-якого виробничого підприємства є мінімізація всіх виробничих витрат, яка досягається шляхом аналізу бізнес-процесів, процесів забезпечення та менеджменту з подальшим застосуванням сучасних технічних засобів та електротехнологій. Системний аналіз даних процесів дозволив із комплексу існуючих проблем низької ефективності технологічних процесів, виділити проблему забезпечення безвідмовної роботи встановленого на підприємстві електрообладнання (ЕО), вирішення якої визначається належною організацією системи підвищення його надійності.

Особливого значення питання підвищення надійності набуває для електричного двигуна (ЕД), як основного споживача електроенергії. Основою парку електричних двигунів є асинхронні електродвигуни. Трифазні асинхронні двигуни (АД) широко застосовуються в усіх галузях промисловості та агропромислового комплексу з огляду на їхню дешевизну та надійність. Вихід з ладу двигуна може призвести до серйозної аварії на виробництві. Діагностика роботи АД в реальному часі є **актуальною задачею**, оскільки дозволяє виявити несправності та визначити режим роботи двигуна, не виводячи його з експлуатації.

Діагностика асинхронного двигуна в режимі його функціонування потрібна для цілого ряду важливих причин:

1. Запобігання аваріям та незапланованим простоям:

- Виявлення початкових ознак несправностей: Діагностика дозволяє виявляти ледь помітні зміни в роботі двигуна (наприклад, підвищення вібрації, нагрівання, зміни в струмі), які можуть свідчити про початок розвитку дефектів.

- Прогнозування терміну служби: Аналізуючи отримані дані, можна прогнозувати, скільки ще двигун зможе пропрацювати до необхідності проведення ремонту або заміни.

- Запобігання катастрофічним поломкам: Раннє виявлення проблем дає можливість вчасно провести технічне обслуговування або ремонт, запобігаючи серйозним пошкодженням двигуна та пов'язаним з ними аварійним зупинкам обладнання.

2. Оптимізація технічного обслуговування:

- Перехід від планово-попереджувального до обслуговування за станом: Замість виконання регулярних, але часто непотрібних перевірок та ремонтів, діагностика дозволяє проводити обслуговування лише тоді, коли це дійсно необхідно, базуючись на фактичному стані двигуна.

- Зменшення витрат на технічне обслуговування: Обслуговування за станом допомагає уникнути зайвих витрат на заміну деталей, які ще знаходяться в робочому стані, та зменшити витрати на усунення наслідків аварійних поломок.

- Планування ремонтних робіт: Завчасно виявлені проблеми дозволяють спланувати ремонтні роботи, замовити необхідні запчастини та підготувати персонал, мінімізуючи час простою обладнання.

3. Підвищення ефективності роботи:

- Виявлення проблем, що впливають на ефективність: Діагностика може виявити такі проблеми, як знос підшипників, незбалансованість ротора або пошкодження обмоток, які призводять до збільшення споживання електроенергії та зниження продуктивності.

- Оптимізація режимів роботи: Аналіз даних діагностики може допомогти оптимізувати режими роботи двигуна, щоб він працював з максимальною ефективністю.

4. Безпека праці:

- Запобігання пожежам та ураженням електричним струмом: Дефекти ізоляції, перегрів та інші проблеми можуть призвести до пожеж та уражень електричним струмом. Діагностика дозволяє виявити ці проблеми на ранній стадії та запобігти нещасним випадкам.

Таким чином впровадження систем діагностики асинхронних двигунів в режимі їх функціонування визначає **мету даної кваліфікаційної роботи.**

Відповідно, **ціллю роботи** являється підвищити надійності, та виявлення проблем, що впливають на ефективність та безпеку роботи асинхронних електродвигунів.

Методи дослідження. Для вирішення основних задач дослідження використано системну методологію аналізу процесів старіння ізоляції, методи теорії подібності та моделювання із застосуванням методів математичної статистики та чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь, логіко-імовірнісний метод розрахунку складного виробу, математичні методи оптимізації, чисельні методи апроксимації функцій, метод інтегральних аналогів, що забезпечують всебічне дослідження надійності двигунів, які експлуатуються в сільському господарстві.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Відельман М. А. ОГЛЯД ДІАГНОСТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 195-198.

Відельман М. А. , Рончинський Я.В. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І АПАРАТІВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 201-204.

Відельман М. А., Коберник В.А. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРУМУ
СТАТОРА ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА АВАРІЙНИХ
РЕЖИМІВ РОБОТИ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 208-210.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОПЕРАТИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

1.1 Методи та засоби оперативної діагностики електромеханічних перетворювачів енергії

Оперативна діагностика електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) проводиться для забезпечення безперебійної роботи ЕМПЕ, виявлення дефектів та їх координат, оцінки ступеня розвитку дефектів.

При оперативних діагностичних дослідженнях ЕМПЕ основними методами є: тепловий, електричний, віброакустичний, хроматографічний і магнітний (за зовнішнім магнітним полем) [4].

Тепловим методом визначаються параметри теплових процесів, що супроводжують електромагнітні процеси при порушеннях нормальних режимів та старінні конструкційних матеріалів, зокрема, температури в пазах статора, стрижнях ротора, щітково-контактного апарату, охолоджувальних рідин і т. д. Метод реалізується за допомогою засобів [1]: терморезисторів, термопар, тепловізорів (VARIO CAM німецької компанії JENOPTIK, LASER, OPTIK, Systems GmbH; FLEXCAM фірми ISI – США; Therma CAM, Therma Vision фірми FLIR Systems; TH9100, TH6100 Thermo View Ti30 фірми Raytek – США), пірометрів і термометрів (MiniTemp ST, ST Pro Plus фірми Raytek – США і т. д.), інфрачервоних тепловізійних камер і систем (Therma CAM фірми FLIR Systems) і т. д.

Електричним методом [4, 6] визначаються електричні параметри ЕМПЕ: відхилення струмів і напруг від номінальних значень за амплітудою, частотою, фазою; поява вищих гармонік у спектрі струмів, напруг і т. д., і проводиться спектральний аналіз гармонік струму та напруги.

Метод дозволяє виявляти наявність міжвиткових замикань в обмотках статора та пошкодження ротора – на частоті живильної мережі (обрив стрижнів, ослаблення кріплення стрижнів до контактних кілець, приховані

дефекти лиття); неспіввісність валів двигуна та механічного навантаження на частотах, кратних частоті обертання електродвигуна; дефекти пасової передачі вентилятора на частотах, кратних частоті биття паса; пошкодження підшипників (необхідні дані про підшипники електродвигуна та механічного пристрою) на частотах, кратних частоті обертання ротора; ексцентриситет ротора (статичний та/або динамічний); ослаблення елементів кріплення електродвигуна; дефекти механічних частин пов'язаних з електродвигуном пристроїв.

Метод дозволяє проводити моніторинг прикладеної до клем ЕМПЕ напруги з метою визначення несиметрії, наявності вищих гармонічних складових та імпульсів перенапруг [2] на основі діагностики спектрів модуля векторів Парка струмів (PI) і напруги (PU).

При збігу всіх ліній у спектрах модуля вектора Парка PI і PU робиться висновок про те, що спектр споживаного струму відповідає живильній напрузі в електричному колі електродвигуна. При виявленні ліній, присутніх у спектрі PI і відсутніх у спектрі PU, робиться висновок про невідповідність спектра споживаного струму живильній напрузі в електричному колі ЕМПЕ, зумовлену несправністю.

У роботі [6] аналізується спектр електричних сигналів у стабільному стані або в частотно-часових координатах за допомогою перетворень Вігнера-Вілля під час роботи в перехідному режимі.

У [7] діагностика здійснюється шляхом контролю обертового моменту M_{em} , причому M_{em} вимірюється в d, q системах відліку, встановлених відносно статора

$$M_{em} = p(\Phi_{sd}i_{sq} - \Phi_{sq}i_{sd}),$$

де $\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, i_{sd}, i_{sq}$ – потоки та струми в d і q системах відліку; p – число пар полюсів, якщо магнітний потік і струми в трьох фазах розглядаються без нейтралі

$$M_{em} = \sqrt{3}p(\Phi_{s3}i_{s2} - \Phi_{s2}i_{s3}).$$

Електричний метод реалізується за допомогою струмових кліщів (DMC-100 та ін. фірма «FNIRSI»), вимірювачів опорів, аналізаторів якості електричної енергії (EM235-PQ-A, EM335-PQ-A «SATEC»; ANA-LYST 3Q – ПРОСОФТ-СИСТЕМС; та ін.), струмових датчиків і т. д.

У роботі [3] в якості діагностичної ознаки використовується інтенсивність часткових розрядів в ізоляції електротехнічного обладнання, а саме параметри, що враховують всі імпульси часткових розрядів, такі як струм і потужність часткових розрядів, амплітудно-частотні та амплітудно-фазові характеристики, максимальний уявний заряд. Встановлено залежність зміни інтенсивності часткових розрядів від стадії старіння ізоляції електротехнічного обладнання. Засоби реалізації методу: цифрові осцилографи PCS-64 виробництва фірми «Velleman», Yokogama DL 540L – фірми Cutler-Hammer – США; системи для постійного моніторингу ЧР в ЕМПЕ (HydroTrac, BusTrac, PDTrac компанії IRIS) та ін.

Віброакустичним методом діагностики визначаються вібраційні параметри ЕМПЕ. В якості еталона використовуються характеристики самого об'єкта діагностування, виміряні на початковому етапі його експлуатації. У [13] розглядається методика виявлення короблення корпусних деталей, дисбалансу, розцентрування, роторів і т. д. на основі аналізу низькочастотних спектрів і функції когерентності, пов'язаних з частотою обертання ротора, і порівняння їх з еталонними спектрами.

У [2] розглядається метод вібродіагностики механізмів за зміною інтенсивності основних віброакустичних джерел шляхом порівняння поточних вібраційних характеристик та основних показників режимів роботи з базовими. Методом оцінюються зміни не тільки окремих складових спектру та загальних рівнів параметрів вібрації у певному частотному діапазоні, але й зміна інтенсивності конкретних віброакустичних джерел та інформативних складових вузькосмугового спектру. Засоби реалізації методу: діагностичні віброаналізатори, мультиметри, датчики вібрації (Vibrotip/VibCode, Vibxpert фірми PRUFTECHNIK, СД-12М систем ВАСТ та ін.).

Складність реалізації вібраційного методу пов'язана з жорсткими вимогами до кріплення вібродатчиків та забезпечення зв'язку з пристроєм обробки інформації.

Хроматографічним методом, на основі аналізу хімічного складу рідин і газів, виявляють перегрів струмоведучих з'єднань та елементів конструкції ЕМПЕ, електричні розряди в маслі трансформатора, контролюють стан ізоляційної системи, магнітної системи, контактних з'єднань, геометричний стан обмоток, систем охолодження, перемикаючих пристроїв і т. д.

У [8] метод поділяється на групи: газову та рідинну, вибір яких визначається фізико-хімічними властивостями досліджуваних ЕМПЕ, та підгрупи: газо-адсорбційну, рідинно-адсорбційну, газорідинну і т. д. Засоби: цифрові мікроскопи фірм Struers, Olympus, EMCO-TEST; флюориметри фірм ALA-1/4, ТОВ «ЕКАР»; УФ- та ІЧ-спектрометри, спектро- та ІФА-фотометри, рефрактометри, флюориметри, іонометричні прилади, електроди фірми Shimadzu.

Хроматографічний метод в основному застосовується для діагностики трансформаторного обладнання та в автомобілебудуванні і непридатний для електричних машин середньої та малої потужності.

Слід відзначити простоту реалізації, відносно низьку вартість, високу продуктивність, широкі можливості автоматизації діагностування теплового та електричного методів. Тим не менш, в певних ситуаціях (низькі температури, складність установки датчиків і т. д.) застосування даних методів ускладнене.

У [4] запропоновано використовувати в діагностичних комплексах, як основний або додатковий, метод діагностики ЕМПЕ за зовнішнім магнітним полем. При цьому контроль діагностичних параметрів здійснюється безконтактним методом, наведено оригінальні конструкції датчиків для підвищення ефективності діагностики [22, 23]. До недоліків роботи слід віднести дослідження неекранованих безкорпусних ЕМПЕ, оскільки наявність корпусу значно впливає на достовірність результатів діагностики за ЗМП.

У [10] наведено метод діагностики асинхронних двигунів (АД) з феромагнітним і алюмінієвим корпусом, за допомогою точкових індукційних перетворювачів; з багатополюсного ЗМП двигунів виділяють магнітне поле з однією парою полюсів, потім методом дзеркальних відображень з корекцією струмів крайніх відображень розраховують радіальну та аксіальну складові індукції магнітного поля цілого та пошкодженого ротора вздовж розгортки:

$$B_{y2}(x) = \sum_{j=1}^{z_2} I_{x2j} B_{y2, \text{вум}}(x);$$

$$B_{z2}(x) = \sum_{j=1}^{z_2} I_{x2j} B_{z2, \text{вум}}(x),$$

де I_{x2j} – струм в j -му елементі кільця ротора, $B_{y2}(x)$, $B_{z2}(x)$ – розподіл індукції магнітного поля вздовж розгортки ротора. Метод призначений лише для діагностики пошкоджень короткозамкненого ротора асинхронних двигунів. Засоби реалізації: тесламетри (ТПУ), веберметри (Ф-191, Ф-199), аналізатори спектра (GSP-827, LSA-132D, NS-30A+PA, АКС-1301, HandyProbe); датчики: індукційні, Роговського, ферозонди, Холла; вимірювачі магнітних полів (ІМП-05) і т. д.

Для отримання найбільш достовірної інформації при оцінці технічного стану ЕМПЕ необхідно вищевикладені методи застосовувати в сукупності, що може бути реалізовано в діагностичних комплексах.

1.2 Діагностичні комплекси електромеханічних перетворювачів енергії

У роботі [11] діагностичний комплекс (ДК) дозволяє виявляти: пошкодження ротора ЕМПЕ; обрив стержнів; ослаблення кріплення стержнів до контактних кілець; приховані дефекти лиття; неспіввісність валів двигуна і механічного навантаження; дефекти ремінної передачі вентилятора; міжвиткові замикання обмоток статора; пошкодження підшипників; підвищений ексцентриситет (статичний і/або динамічний); ослаблення елементів кріплення; дефекти механічної частини, пов'язаних з ЕМПЕ пристроїв; несиметрію прикладеної до ЕМПЕ напруги; наявність вищих

гармонічних складових та імпульсів перенапруг. Особливостями ДК є те, що при виявленні наявності пошкоджень електричної та/або механічної частини ЕМПЕ і пов'язаного з ним механічного пристрою враховуються характерні (і такі, що не збігаються) частоти певної величини в спектрі струму ЕМПЕ; при проведенні повторних вимірювань формується база даних, яка дозволяє відстежувати динаміку розвитку пошкоджень у часі, що дає можливість завчасно планувати виведення обладнання в ремонт.

ДК «Janitza UMG 605-PRO» (рис. 1.1)[8] дозволяє: контролювати стан ЕМПЕ на основі порівняння значень виміряних електричних і механічних ДП зі значеннями параметрів діагностичної моделі; визначати місце і причину відмови або несправності шляхом аналізу зареєстрованих значень діагностичних параметрів; відстежувати зміни значень цих параметрів у процесі експлуатації; прогнозувати розвиток несправностей. Комплекс оснащений програмним забезпеченням (ПЗ), яке забезпечує: повний цикл збору та обробки даних; запис сигналів з відображенням на екрані в реальному часі графіків вихідних сигналів; автоматизований експрес-аналіз; ручну обробку отриманих даних.



Рисунок 1.1 – Діагностичний комплекс «Janitza UMG 605-PRO»

ДК «Janitza UMG 509-PRO» (рис.1.2) Ридозволяє [8] осцилографувати та обробляти параметри технологічних процесів; спрощує пусконаладжувальні та ремонтні роботи; виявляє рідкісні «випадкові» відмови електрообладнання тощо.



Рисунок 1.2 - Діагностичний комплекс «Janitza UMG 509-PRO»

ДК EXPLORER Series II [8] визначає стани підвищеної та зниженої напруги, а також рівень несиметрії напруг (у відсотках); виявляє нелінійні спотворення за напругою (напруги фаза-нейтраль); стани стержнів обмотки ротора для ідентифікації частотних складових, які виникають у спектрі струму внаслідок руйнування клітки ротора; виявляє перевантаження за струмом: максимальний фазний струм порівнюється з номінальною величиною, вказаною на паспортній таблиці; визначає ККД, коливання навантаження, що прикладається до ЕМПЕ; проводить аналіз миттєвої форми сигналу для моніторингу часової залежності навантаження або миттєвих коливань навантаження для визначення областей перевищення паспортних характеристик.

Особливості ДК EXPLORER Series II: безпечний, мобільний, призначений для роботи у найважчих умовах; дає можливість глибоко зазирнути в систему двигун-механізм. ПЗ працює з базою даних по ЕМПЕ багатьох виробників, дозволяючи порівнювати характеристики та ефективність роботи.

ДК «MDR» (Motor and Generator Diagnostics Relay) [7] здійснює контроль технічного стану ізоляції обмотки статора за рівнем часткових розрядів; вимірює та аналізує вібрації пакета сталі статора, виявляє передумови для порушення ізоляції обмотки та пакета статора на самих ранніх стадіях розвитку; оцінює стан ізоляції обмотки ротора за радіальною складовою

магнітного поля в зазорі ЕМПЕ; визначає динамічне положення та вібрації ротора в зазорі, відносно статора, в процесі роботи ЕМПЕ; контролює електромагнітну асиметрію статора ЕМПЕ за спектром споживаного струму та потужності; вимірює величину поздовжньої електрорушійної сили вала турбоагрегату та інтенсивність ерозійних процесів в опорних підшипниках, зумовлених цією електрорушійною силою; здійснює моніторинг стану колекторного вузла турбогенератора, включаючи прямий контроль за роботою кожної щітки.

В системі «MDR» реалізовано комплексний підхід до оцінки стану ЕМПЕ, коли його поточний стан оцінюється кількома методами. Це дозволяє проводити діагностику ЕМПЕ, що працюють в умовах небезпечних виробництв (на підприємствах нафтохімічної промисловості).

ДК REMM (Rotation Electrical Motor Monitor) [7] дозволяє виявляти: електромагнітну несиметрію статора; дефекти обмотки ротора; здійснювати контроль: стану ізоляції статора за рівнем часткових розрядів; вібраційного стану пакета статора ЕМ; електричних параметрів статора; температурних режимів статора. ДК відрізняється можливістю розширення його властивостей за рахунок поставки додаткових модулів, що складають його конструкцію.

ДК AMTest-2 [9] дозволяє: виявляти дефекти підшипників; незбалансованість ротора; розцентрування з приводним механізмом; неправильний монтаж ротора відносно статора; наявність проблемних стержнів у клітці ротора; контролювати якість пайки провідників обмотки ротора; нерівномірність процесу комутації по колу колектора. ДК відрізняється тим, що дозволяє досліджувати трифазну напругу живлення струмів, споживаних у фазах контрольованого ЕМПЕ, при цьому контролюється не тільки рівень, але й несиметрія трифазних параметрів, рівень гармонік в напругах і струмах, споживана ЕМПЕ потужність.

ДК для діагностики ЕМПЕ [12] дозволяє виявляти: несиметрію обмоток, несиметрію магнітної системи, несиметрію основного повітряного зазору,

дефекти статора, дефекти підшипникового вузла, ексцентриситет, міжвиткові та міжфазні замикання обмоток, дефекти ізоляції. ДК дозволяє визначати характер пошкодження за результатами діагностики за принципом залежності зміни індукції ЗМП електродвигуна від розвитку в ньому дефектів.

ДК для контролю стану підшипників електричної машини [4] вимірює основні механічні та/або електромеханічні характеристики; задає певний режим роботи; моделює несправні стани; вимірює ЗМП в навколишньому просторі в заданих координатах і робочих режимах роботи ЕМПЕ; проводить математичну обробку даних вимірювань, спектральний аналіз, записує та видає результат на екран персонального комп'ютера. Датчик зовнішнього магнітного поля встановлюється на поверхні електричної машини, що не потребує її зупинки та розбирання.

ДК SUPER [3] фіксує щохвилини 52 механічних і 10 електричних параметрів і містить 50 уставок на сигнал. В основний процесор дані передаються 1 раз на годину. При спрацюванні будь-якої з уставок (сигнал тривоги означає вихід контрольованого параметра за допустимі межі) в процесор передаються дані за попередню годину роботи.

Математичне забезпечення дозволяє обробляти та передавати сигнали датчиків, здійснювати постійний контроль і аналіз в режимі on-line і проводити спеціальні тести.

Наведені ДК, незважаючи на свою багатофункціональність, все ж таки мають ряд недоліків:

- обмеженість набору методів, що характеризують ДК;
- не дозволяють діагностувати екрановані ЕМПЕ;
- видають однозначні результати: «придатний» – «брак»;
- оцінюють не функціональний стан ЕМПЕ, а виявляють тільки наслідки несправностей.

Таким чином, враховуючи вищевикладене, для підвищення достовірності оперативної діагностики технічного стану ЕМПЕ виявлено необхідність:

- вдосконалення існуючих та розробки нових методів і засобів оперативної

діагностики ЕМПЕ;

- розробки засобів комплексної діагностики ЕМПЕ середньої та малої потужності, на основі магнітного (за зовнішнім магнітним полем), теплового, електричного та вібраційного методів.

1.3 Стан та перспективи впровадження систем моніторингу та технічного діагностування електричних машин і апаратів

Електричні двигуни широко застосовуються в багатьох галузях народного господарства. Синхронним та асинхронним електроприводом споживається більше половини електроенергії, виробленої у світі. Різні електродвигуни поширені в різних галузях виробництва та переробці сільськогосподарської продукції. Від їх надійності функціонування залежить рівень видатків при масовому випуску продукції, а також безпека, надійність та стійкість роботи атомних реакторів при відмовах у функціонуванні подачі теплоносія. У зв'язку з цим вирішення проблеми моніторингу і технічної діагностики електродвигунів не втратило своєї актуальності на даний час.

Метою технічного діагностування являється аналіз та вибір реалізації підходів до побудови системи моніторингу та оцінки технічного стану потужних електричних машин. В даний час підтримання експлуатаційної надійності електричних машин здійснюється методами діагностики у відключеному стані. Тестове діагностування - основний вид виявлення дефектів електрообладнання у вітчизняній енергетиці. Воно визначило сформовану структуру технічного обслуговування та ремонту за регламентом. Незважаючи на те, що технічні рішення зі створення систем моніторингу електричних машин існують, на сьогодні ефективність їх практичного застосування доведена частково [1, 2].

У створенні систем моніторингу сформувалося два основних напрямки. Один з них пов'язаний з прямим отриманням якомога більш детальної інформації про стан параметрів важливих підсистем електричної машини (рис. 1.3).

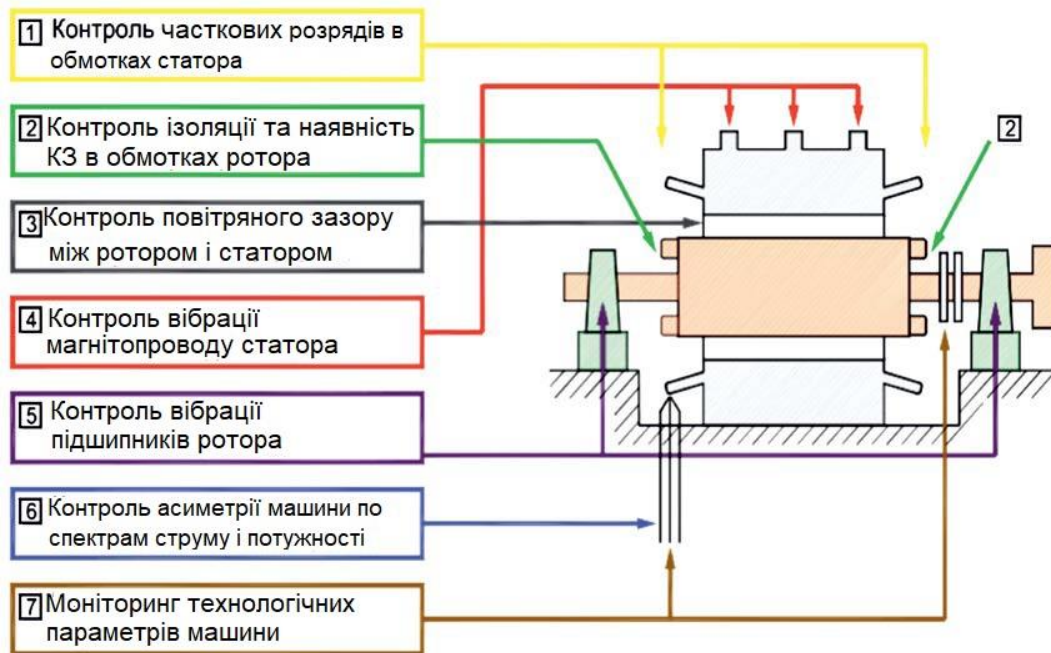


Рисунок 1.3 - Схема системи моніторингу

У даній системі моніторингу пропонується здійснювати контроль струму статорної обмотки та його подальший спектральний аналіз. Проводиться контроль рівня вібрації та температури корпусу і підшипників, крім того, внутрішніми датчиками, встановленими в статор, здійснюється контроль асиметрії положення ротора. Контроль стану ізоляції проводиться за частковими розрядами, а температурний режим активної сталі та обмоток – за допомогою термодатчиків, встановлених у статорній обмотці. Останнім часом на потужних турбогенераторах систему моніторингу доповнюють температурними датчиками охолодження, встановленими на зливних колекторах охолодження обмоток статора. Є приклади встановлення датчиків вібрації на вивідних і з'єднувальних шинах статорної обмотки.

Досить очевидно, що такий підхід потребує встановлення численних датчиків. У системі REMM передбачається встановлення більш ніж тридцяти чутливих елементів у конструкцію двигуна, тому подібні технічні рішення можна розглядати лише на стадії проектування двигуна. Через складність систем подібного типу, їх застосування доцільне на потужних турбогенераторах і гідрогенераторах.

Включення в систему моніторингу контролю часткових розрядів, видається нераціональним, через слабку завадостійкість цих підсистем. На рис. 1.4, як ілюстрацію, показано панораму розрядних явищ, зафіксовану під час високовольтних випробувань нового асинхронного двигуна ГЦН з робочою напругою 6,3 кВ.

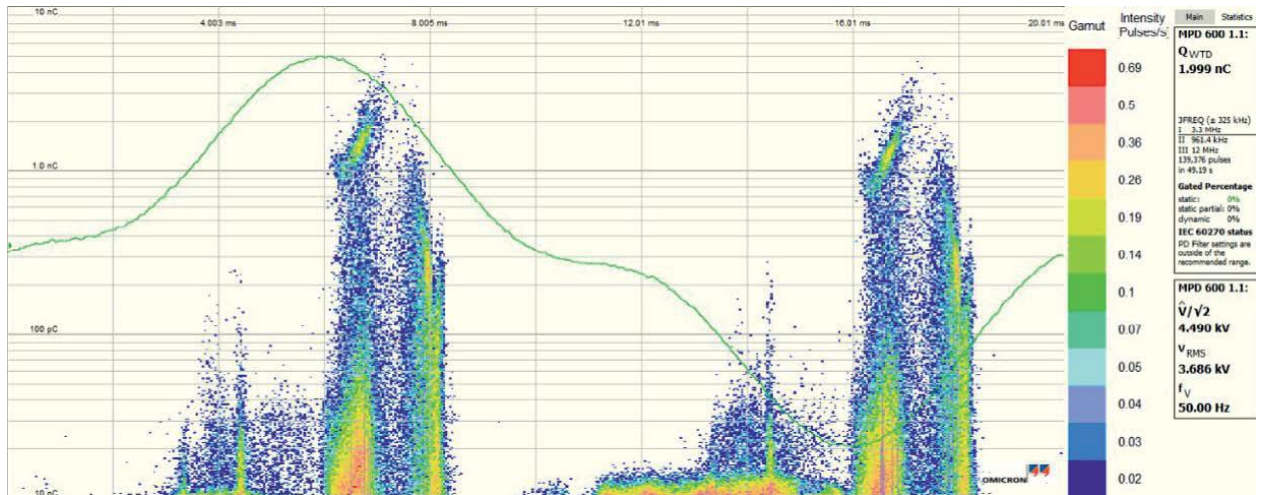


Рисунок 1.4 — Панорама розрядних явищ, зафіксована системою контролю часткових розрядів MPD-600 під час високовольтних випробувань нового асинхронного електродвигуна типу А-310 із загальмованим ротором при номінальній напрузі від мережі в межах періоду робочої напруги

Зафіксований рівень часткових розрядів в ізоляції статорної обмотки досягав практично граничного рівня порядку 8 нКл, при номінальній лінійній напрузі 4,5 кВ. Подібний результат був зумовлений проникненням мережевої завади в канал контролю часткових розрядів. З цієї причини введення в систему моніторингу каналу контролю рівня часткових розрядів, на наше переконання, може розглядатися виключно як додатковий інформаційний канал. Системи моніторингу подібного типу, в одиничному і усіченому виконанні, знайшли поодинокі застосування на потужних турбогенераторах і гідрогенераторах.

Інший напрямок робіт в області створення систем моніторингу заснований на припущенні, що інформація про стан всіх підсистем електричної машини закладена в струмі його статорної обмотки. Метод знайшов своє відображення в ДСТУ ISO 2365-94 [5] і відомий під назвою «Машини електричні асинхронні

потужністю до 400 кВт. Двигуни». Статорна обмотка працюючого двигуна є таким собі універсальним «датчиком» стану ланцюгів живлення машини та інших її підсистем, в тому числі і механічних вузлів. Інформаційними сигналами служать напруга живлення і споживані струми, які модулюються самим двигуном в роботі під навантаженням і формують вихідний сигнал у вигляді спектру гармонік струму статора. Порушення в роботі двигуна можуть бути виявлені за складовими гармоніками споживаного струму. Мова йде не тільки про порушення в електричній частині обмоток, але і про механічні несправності, які викликають характерні спектральні зміни в споживаному струмі.

Методу спектрального аналізу струму, споживаного електродвигуном, присвячені в основному роботи зарубіжних авторів. Згідно з доступними даними, сигнатурний аналіз дозволяє виявляти в працюючому електродвигуні ряд серйозних дефектів і несправностей.

Для виявлення дефектів, що розвиваються, роторних машин сьогодні випускаються системи моніторингу СДРМ (рис.1.5)[4, 5]. В системі використано методику, в основу якої покладено математичну модель, що описує ідеальну роторну машину та систему, в якій вона працює. Як і в реальній роторній машині, в математичній моделі вхідними величинами є напруги, а вихідними — струми. В процесі моделювання порівнюється вимірний і розрахований спектри струму. За їх різницею робиться висновок про ступінь дефекту. Чим більша різниця, тим серйозніший дефект. Більш детальну інформацію про дефекти можна отримати при аналізі додаткових параметрів. Механічні дефекти будуть виявлені за зміною параметрів математичної моделі. Таким чином, дана технологія чутлива не тільки до електричних дефектів, але також і до механічних. На сьогодні у вітчизняній практиці роботи, присвячені питанням контролю стану, моніторингу та діагностики двигунів методом спектрального аналізу споживаного струму, практично відсутні.

За заявою виробника, система СДРМ призначена для:

- аналізу електричних і механічних параметрів роторної машини;
- виявлення та відстеження розвитку різних дефектів.

В процесі роботи СДРМ порівнює виміряні параметри двигуна з параметрами опорної моделі, отриманими в процесі навчання пристрою. Якщо параметри значно відрізняються один від одного, то система вказує на наявність в ній несправностей або дефектів. Чим вища ця відмінність, чим довше вона триває і чим більше відрізняючихся контрольованих параметрів, тим вищий ступінь і серйозність розвитку дефекту.

Згідно з заявленими можливостями СДРМ виявляє:

- ослаблене кріплення опор; - розбалансування ротора;
- порушення зчеплення двигуна з приво- дними механізмами;
- дефекти підшипників;
- дефекти елементів трансмісії/приво- дного обладнання;
- дефекти ротора та дефекти обмотки статора;
- дефекти контактних з'єднань.

Параметри, що вимірюються і розраховуються системою:

- фазна напруга;
- споживаний струм;
- активна потужність.



Рисунок 1.5 – Система моніторингу дефектів роторних машин СДРМ

До основних електричних і механічних параметрів, при перевищенні яких приймається рішення про відключення електричної машини, відносять:

- роботу з підвищеним навантаженням, зниження ККД та перегрів двигуна;
- підвищений пусковий струм;
- вібрації; - підвищений рівень температури вузлів двигуна.

У технічному описі системи наведено перелік можливих дефектів, виявлених системою, але відсутні відомості, яким чином вони співвідносяться з спостережуваним спектром потужності гармонік. Відхилення цих параметрів понад рівень огинаючої спектра потужності, розглядається як наявність пошкодження. Кожній смузі частот приписані функціональні елементи електричної машини (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 — Частотні діапазони параметрів електродвигуна

Параметр	Позначення параметра	Мінімум частоти, Гц	Максимум частоти, Гц
Стан контактів	M1	0,00	8,54
Несоосність з'єднань	M2	8,54	26,86
Частота мережі живлення	M3	26,86	43,95
Балансування ротора	M4	43,95	57,37
Балансування навантаження	M5	57,37	70,80
Обмотка статора	M6	70,80	96,44
Підшипники двигуна	M7	96,44	108,64
3-тя гармоніка	M8	108,64	141,60
Підшипники навантаження	M9	141,60	158,69
4-та гармоніка	M10	158,69	168,46
Кріплення двигуна	M11	168,46	191,65
6-та гармоніка	M12	191,65	499,27

Очевидно, що при наявності ковзання вала, положення гармонік змінюється по частоті, це вимагає розширення смуги вікна аналізу, і тоді чутливість до розпізнавання дефектів знижується. Різні за природою механічні та електричні дефекти можуть генерувати близькі гармоніки, що не дозволяє відокремити їх один від одного. До таких причин можна віднести:

- якість напруги живлення (дисбаланс напруги між фазами, або неприпустимий рівень високочастотних гармонік);

- дефекти лиття вала та ротора;
- дефекти обмоток і систем збудження;
- пошкодження або обрив статорних обмоток і стержнів ротора;
- дефекти підшипників;
- ексцентриситет ротора;
- неправильна установка та перекіс торцевих кришок електродвигуна;
- порушення центрування між електродвигуном і веденим агрегатом;
- зміною жорсткості кріплень електродвигуна до фундаменту.

Всі зміни електричних параметрів обмоток та ізоляції, ведуть до збільшення втрат, підвищення температури. Очевидно, що різні причини можуть призводити до інтегральних змін спектральних параметрів. Проблемною ланкою в успішному застосуванні систем є інтерпретація отриманих даних. Відсутність таких напрацювань і є основною перешкодою впровадження систем моніторингу в практику.

Проведені дослідження, спрямовані на ідентифікацію дефекту короткого замикання статорної обмотки синхронного двигуна, показали:

- амплітуди спектру струму на бокових частотах будь-якої непарної гармоніки мають різні значення і можуть відрізнятися на порядок і більше;
- амплітуди спектру бокових частот зменшуються зі зростанням частоти непарної гармоніки;
- величина амплітуд бокових спектральних складових діагностичних частот збільшується приблизно пропорційно ступеню короткого замикання. При цьому, чим більше число витків обмотки піддається короткому замиканню, тим на більш ранній стадії розвитку виявляється дефект.

Визначення спектральних складових струму від ослаблення кріплення або обриву стержнів ротора показали:

- амплітуди спектра струму на бокових частотах першої гармоніки мають суттєві зміни від обриву стержнів ротора, а на бокових частотах гармоніки більшого порядку швидко зменшуються;

- величина амплітуд бокових спектральних складових діагностичних частот зростає зі збільшенням числа обірваних стержнів ротора, але закономірності їх зміни виявити не вдалося;

- при малих навантаженнях на валу, коли коефіцієнт ковзання ротора прямує до нуля, дефекти обриву обмотки ротора не визначаються. Визначення складових спектра струму від зносу підшипників показали:

- дефекти доріжок кілець і тіл кочення у вигляді окремих сколів, раковин, вм'ятин методом спектрального аналізу спектра струму не ідентифікуються;

- дефекти зносу тіл кочення, якщо вони призводять до збільшення люфту підшипника, добре ідентифікується методом спектрального аналізу спектра струму на діагностичних частотах;

- амплітуда складових спектра струму повітряного зазору або ексцентриситету, ідентифікується в діапазоні частот від 200 до 1500 Гц, їх значення в кожному піддіапазоні можуть відрізнитися на кілька порядків. Ідентифікацію наявності і розвитку дефекту ексцентриситету найбільш доцільно проводити на піддіапазонах в межах від 500 до 1200 Гц, де зміни амплітуд найбільші за величиною та інтенсивністю;

- при оцінці ступеня розвитку ексцентриситету, як динамічного, так і статичного, слід враховувати можливість впливу на нього інших дефектів: короткозамкнених витків статора, обрив стержнів ротора, неспіввісність валів і якості живлення електродвигуна;

- при розрахунку значень діагностичних частот ексцентриситету потрібна більш висока точність у визначенні величини ковзання ротора, оскільки помилки в її оцінці впливають на чутливість виявлення ексцентриситету.

Спектральні складові струму від неспіввісності валів, ослаблення кріплення станини, коливання ротора, показують, що ідентифікувати дефект подібних вібрацій не представляється можливим. Дефект автоколивань ротора

в підшипниках є частковим випадком загального зносу підшипника (люфту), з тією ж оцінкою величини амплітуд спектральних складових струму.

Проведені експериментальні дослідження асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором вказують на принципову можливість оцінки ряду дефектів або несправностей і дозволяють оцінити їх порогові значення виявлення. Але в частині інтерпретації даних спектрального аналізу енергетичного спектра по струму статора ще належить чимала робота. В якості ілюстрації на рис. 1.6 приведений вид екрана монітора, за яким приймається рішення про виведення двигуна з роботи.

Визначення дефектів, як правило, покладається на подальше технічне діагностування двигуна у вимкненому стані та застосування так званих додаткових «багатопараметричних» методів контролю [6, 7]. Найбільш ефективними, з точки зору повноти даних, є підходи, пов'язані з одночасним отриманням якомога повнішої інформації про наявність дефектів на вимкненому двигуні та під час роботи. Кореляція статичних і динамічних даних випробувань дає можливість оцінити реальний технічний стан двигуна та надати надійний прогноз його працездатності. Серед систем подібного призначення, в яких реалізовані ці можливості, можна віднести аналізатор ланцюгів двигунів (МСЕ) та систему динамічного аналізу (DMA), що виробляються корпорацією PdMA.

Особливості пропонованої методології побудови системи, апробовані на синхронних та асинхронних електродвигунах, а також силових трансформаторах, полягають у побудові дворівневої системи моніторингу та технічної діагностики. Дворівнева система моніторингу оптимально поєднує попереджувальні дії персоналу до виникнення пошкодження обладнання та подальші дії з виявлення конкретних несправностей.

Першим рівнем у даній системі є контроль параметрів двигуна в роботі та отримання попередніх даних. Проводиться контроль параметрів струмів і напруг під час роботи двигуна. При цьому визначаються:

- спектральний склад живлячої напруги, струму та потужності;

- температурний режим корпусу статора та підшипників і приводу.

На підставі цих вимірювань робляться висновки:

- про якість живлячої напруги;
- наявність та рівень непарних бокових гармонік, пов'язаних з дефектами обмоток статора та ротора.

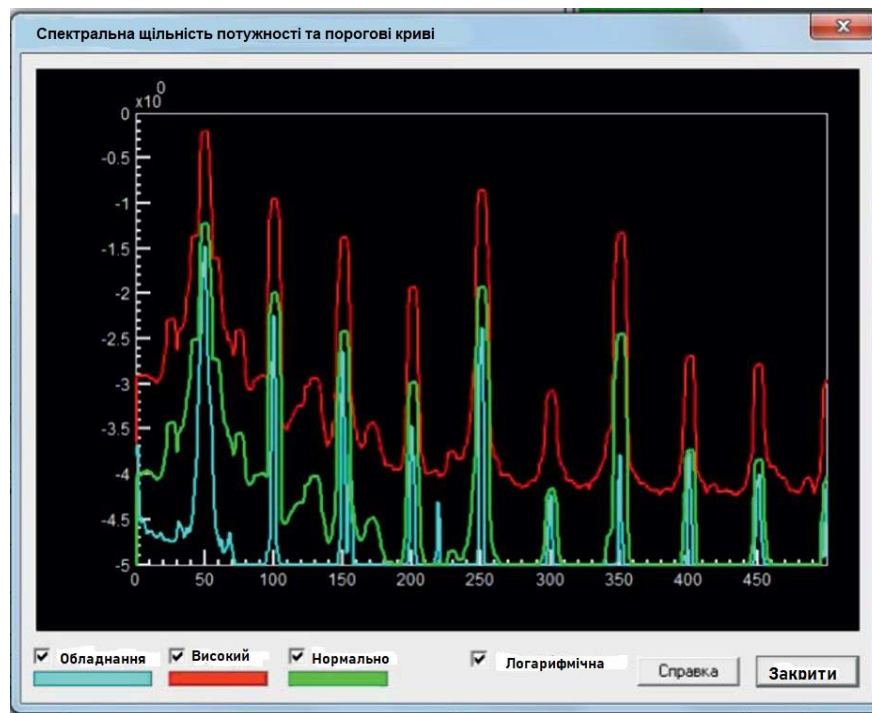


Рисунок 1.6 — Частотний спектр густини потужності двигуна за результатами моніторингу (огинаюча спектра, позначена червоним кольором – гранично допустимий рівень)

До відключення двигуна проводиться вібраційний та тепловий контроль стану корпусних, підшипникових та приводних елементів. Тепловий контроль підсистем проводиться тепловізійним методом. При наявності перевищень порогових рівнів спектральних, температурних та вібраційних параметрів контролю електродвигун виводиться з роботи.

Другий рівень. Контроль параметрів на відключеному обладнанні для зіставності результатів вимірювань проводиться в автоматичному режимі по всім фазам та параметрам. Контроль виконується за параметрами, значення яких суворо регламентовані граничними рівнями. Дані контролю по всім

фазам виводяться на монітор. Зіставлення параметрів проводиться між фазами або тотожним параметрам об'єкта порівняння. Оперативний аналіз отриманих даних дозволяє з вірогідністю 90–95 % визначити характер дефекту, ступінь небезпеки та його розвитку і місце розташування.

Однією з безперечних переваг подібної дворівневої системи моніторингу та визначення технічного стану і конкретних несправностей електродвигунів є наявність чітких критеріїв на параметри контролю. Одні з них випливають з існуючої нормативної документації (Обсяги та Норми...), інші, такі як фазовий і частотний критерії бракування, ще не знайшли свого відображення в нормативній документації, але з урахуванням високої інформативності їх, очевидно, слід вводити законодавчо на галузевому рівні. До подібних параметрів можна віднести такі параметри, як індекс поляризації та значення тангенса кута діелектричних втрат, визначені методами низькочастотної діелектричної спектроскопії, а також удосконалений тепловізійний метод контролю, що дозволяє судити про виникнення в машині пошкоджень, які призводять до зростання теплових втрат і прискореного старіння ізоляції [6–8].

Висновки по першому розділу

На основі аналізу сучасних методів і засобів оперативної діагностики виявлено, що:

- необхідна розробка діагностичних комплексів для ЕМПЕ середньої та малої потужності;
- необхідна розробка програмного забезпечення діагностичних комплексів, що здійснюють формування діагностичних критеріїв, для підвищення достовірності діагностичної інформації на основі теплового, вібраційного, електричного та магнітного (за картою ЗМП) методів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДІАГНОСТИКИ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ НЕСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В РЕЖИМІ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ

1.2 Аналіз методики струмової діагностики асинхронних двигунів за осцилограмами нестационарних режимів роботи

Створення сучасних енергозберігаючих електротехнічних систем тісно пов'язане з питаннями підвищення надійності експлуатації електроприводів технологічних агрегатів і викликає необхідність здійснення постійного моніторингу стану електродвигунів. При цьому можна скористатися різними методами діагностики стану двигуна. Одним з ефективних є метод, що базується на спектральному аналізі споживаного двигуном струму [1, 2]. На його основі з'являється можливість визначати стан різних елементів двигуна та виявити найбільш поширені несправності:

- пошкодження ротора (обрив стержнів, ослаблення кріплення стержнів до контактних кілець, приховані дефекти лиття);
- підвищений ексцентриситет ротора (статичний і динамічний);
- міжвиткові замикання обмоток статора;
- пошкодження підшипників;
- неспіввісність валів двигуна та механічного навантаження;
- дефекти механічної частини пристроїв, пов'язаних з електродвигуном.

Кожен дефект і несправність вносять у картину процесу електроспоживання свої особливості, а саме зміни основних характеристик сигналів. Дійсно, будь-які «збурення» за станом електричної та механічної частини електродвигуна призводять до змін магнітного потоку в зазорі електричної машини і, отже, до модуляції споживаного струму.

Таким чином, наявність у спектрі струму двигуна характерних (і неспівпадаючих) частот певної величини свідчить про наявність або появу зазначених вище дефектів. Перетворення Фур'є, як відомо, дозволяє здійснити гармонічний аналіз стаціонарних режимів, що задовольняють умовам Діріхле.

При цьому для достовірної діагностики стану електродвигуна необхідно здійснювати експрес-обробку осцилограм статорного струму відносно великої тривалості при постійній частоті та слабо змінному навантаженні. Для двигунів, що постійно працюють у динамічних режимах (часті пуски та гальмування), даний метод непридатний. У зв'язку з цим необхідно розглянути можливості інших методів обробки сигналів, включаючи найсучасніші, засновані на комп'ютерних технологіях.

У динамічних режимах, коли багаторазово зростають навантаження у всіх вузлах електродвигуна, багато дефектів, навіть на стадії розвитку, проявляються більш помітно в струмових та акустичних сигналах. Для їх розпізнавання необхідно створити бібліотеку (базу даних) ознак тієї чи іншої несправності на основі математичної обробки осцилограм статорного струму. Необхідно зазначити, що методологічні аспекти подібного роду процедур діагностування в даний час знаходяться в розвитку. Одним з перспективних напрямків є комп'ютерні дослідження на моделях електромеханічних пристроїв, в складі яких вдається імітувати різні дефекти.

В даний час відомі моделі двигунів досить точно відображають характер протікання електромагнітних та електромеханічних процесів у завідомо справному електродвигуні і не дозволяють досліджувати вплив різних дефектів та несправностей на основні характеристики двигунів. У цих умовах актуальною стає задача розробки нових моделей електродвигуна, на основі яких реалізується можливість проведення досліджень впливу на контрольовані параметри різних несправностей.

Під час розробки універсальної моделі пропонується скористатися методом скінченних елементів (finite-element method) [3, 4, 6], що дозволяє здійснити розрахунок картини магнітного поля в поперечному перерізі машини для кожного моменту часу з урахуванням передісторії процесу. В основі цього методу лежить розбиття розрахункової області сіткою скінченних елементів, найчастіше трикутників, як це показано на рис. 2.1 для поперечного перерізу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Значення

характеристик поля розраховуються або у вузлах сітки, або в центрі ваги кожного скінченного елемента.

Найчастіше магнітне поле в межах активного простору двигуна представляється плоскопаралельним, тобто в будь-якому поперечному перерізі машини картина поля залишається незмінною. Даний метод дозволяє точно враховувати геометрію машини в її поперечному перерізі, а також електричні параметри двигуна, включаючи нелінійність кривої намагнічування та інші особливості, як, наприклад, можливі дефекти в магнітній і витковій системі електричної машини. Метод скінченних елементів дозволяє здійснити розрахунок миттєвої картини магнітного поля за задалегідь відомими значеннями густин струму в пазах статора і ротора. У зв'язку з цим представляє інтерес розробка скінченно-елементної моделі асинхронного двигуна, що дозволяє безпосередньо розраховувати значення густин струмів в кожен момент часу, виходячи з динамічно мінливої картини магнітного поля, миттєві значення якого, в свою чергу, залежать від значень густин струму в кожен конкретний момент часу.

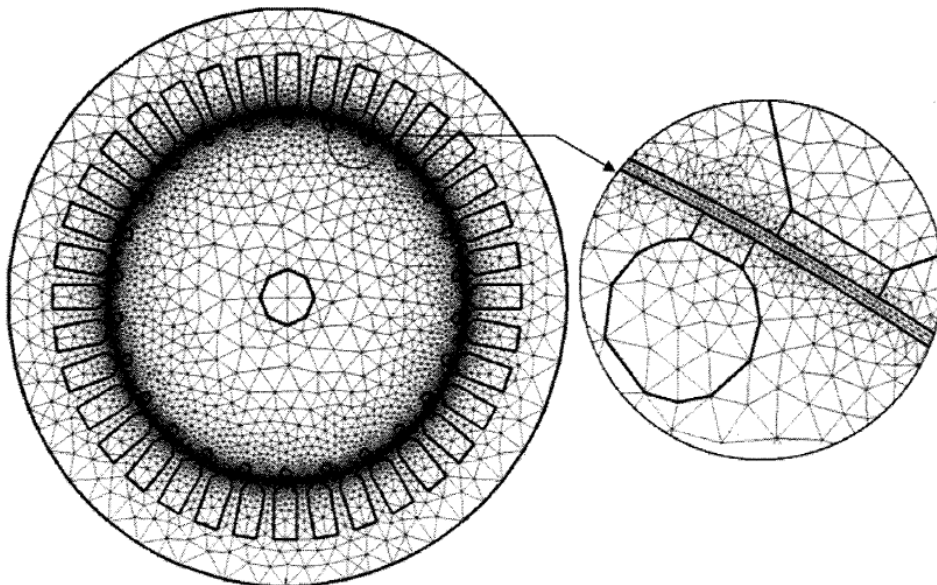


Рисунок 2.1. Розрахункова область поперечного перерізу асинхронного двигуна з сіткою скінченних елементів

Як відомо, електромагнітне поле описується системою рівнянь Максвелла (3, 5], яку стосовно до теорії електричних машин можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j}; \quad \vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} + \vec{j}_{\text{сноп}}; \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0; \\ \vec{B} &= \mu_a \vec{H}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Дані рівняння є загальновідомими в теорії електротехніки і не потребують додаткових коментарів.

Миттєву картину плоскопаралельного електромагнітного поля в поперечному перерізі асинхронного двигуна можна описати скалярним неоднорідним рівнянням Гельмгольца [3]:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial A}{\partial t} = -j_{\text{сноп}}. \quad (2.2)$$

Дане рівняння є прямим наслідком системи рівнянь (2.1) і записується відносно векторного магнітного потенціалу поля \vec{A} , ротор якого дорівнює індукції магнітного поля в даній точці [13]:

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}. \quad (2.3)$$

Оскільки поле плоскопаралельне, то при орієнтації осі z системи координат паралельно осі вала машини, вектор індукції магнітного поля \vec{B} лежатиме в площині xOy , поперечного перерізу машини. Тоді згідно з першим і третім рівнянням системи (2.1) та рівнянню (2.2) вектор щільності струму провідності \vec{j} і векторний потенціал \vec{A} будуть паралельними осі z . Це дозволяє перейти від векторів до скалярних величин в рівнянні (2.2).

Густина струму та значення векторного магнітного потенціалу в межах кожного окремого скінченного елемента розрахункової області представляються незмінними. Отже, всередині кожного скінченного елемента електромагнітне поле можна описати рівнянням (2.3). Для того, щоб описати повну картину поля, необхідно розв'язати систему, що складається з рівнянь виду (2.2), розмірність якої дорівнює числу кінцевих елементів. Завдання ускладнюється тим, що кожного разу при зміні кута повороту ротора змінюється геометрія розрахункової області, і це призводить до необхідності переозначення сітки скінчених елементів. Розв'язання рівнянь параболічного

типу, до якого належить рівняння (2.2), методом скінченних елементів на непостійній сітці є складною задачею. Щоб спростити її, подамо часткову похідну за часом від векторного магнітного потенціалу у вигляді скінченної різниці [4]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A - A_0}{\Delta t}, \quad (2.4)$$

де A - значення векторного магнітного потенціалу в розглядуваній точці на даній ітерації, A_0 - значення векторного магнітного потенціалу в тій самій точці на попередній ітерації, Δt - дискрета часу.

Використовуючи друге та четверте рівняння системи (2.1) і рівняння (2.3), густина струму провідності, зумовленого явищем електромагнітної індукції, можна виразити через векторний магнітний потенціал:

$$j = \frac{1}{\rho} E = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (2.5)$$

Густина стороннього струму провідності $j_{\text{стор}}$ в кожній точці провідника, поміщеного в змінне магнітне поле, може бути представлена як результат дії суперпозиції електричних полів, що виникають в інших областях, електрично зв'язаних з розглянутою точкою, внаслідок явища електромагнітної індукції або під дією зовнішніх джерел ЕРС. Стрижні короткозамкненого ротора електрично з'єднані один з одним контактними кільцями. Отже, для i -го кінцевого елемента, що лежить всередині одного з пазів ротора, густина стороннього струму провідності може бути представлена як функція від похідних векторного потенціалу за часом в інших кінцевих елементах, що лежать всередині пазів ротора:

$$j_{\text{стор},i} = f\left(\frac{\partial A_{r1}}{\partial t}, \frac{\partial A_{r2}}{\partial t}, \dots, \frac{\partial A_{r,i-1}}{\partial t}, \frac{\partial A_{r,i+1}}{\partial t}, \dots, \frac{\partial A_{rM}}{\partial t}\right), \quad (2.6)$$

де A_r - векторний магнітний потенціал довільного кінцевого елемента, що лежить всередині одного з пазів ротора, M - загальна кількість кінцевих елементів, що лежать всередині всіх пазів ротора.

Щодо густини стороннього струму - у статорних обмотках, окрім явища електромагнітної індукції, в кожний момент часу впливають миттєві значення

фазних ЕРС живильної мережі двигуна. Отже, аналогічно для j -го кінцевого елемента, що лежить всередині одного з пазів статора:

$$j_{\text{стоп},j} = f\left(\frac{\partial A_{s1}}{\partial t}, \frac{\partial A_{s2}}{\partial t}, \dots, \frac{\partial A_{s,i-1}}{\partial t}, \frac{\partial A_{s,i+1}}{\partial t}, \dots, \frac{\partial A_{sN}}{\partial t}, e_a, e_b, e_c\right), \quad (2.7)$$

де A_s - векторний магнітний потенціал довільного скінченного елемента, що лежить всередині одного з пазів статора, N - загальна кількість скінченних елементів, що лежать всередині всіх пазів статора, e_0, e_b, e_c - миттєві значення фазних ЕРС живильної мережі двигуна.

Згідно з (2.2), (2.4), (2.6) та (2.7) систему рівнянь для розрахунку значень векторного магнітного потенціалу у всіх скінченних елементах розрахункової області в кожен момент часу можна представити у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_{ri}}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_{ri}}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{A_{ri} - A_{0ri}}{\Delta t} = -f \left(\frac{A_{r1} - A_{0r1}}{\Delta t}, \frac{A_{r2} - A_{0r2}}{\Delta t}, \dots, \frac{A_{r,i-1} - A_{0r,i-1}}{\Delta t}, \right. \\ \left. \frac{A_{r,i+1} - A_{0r,i+1}}{\Delta t}, \dots, \frac{A_{rM} - A_{0r,M}}{\Delta t} \right) \\ \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_{rj}}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_{rj}}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{A_{rj} - A_{0rj}}{\Delta t} = -f \left(\frac{A_{s1} - A_{0s1}}{\Delta t}, \frac{A_{s2} - A_{0s2}}{\Delta t}, \dots, \frac{A_{s,j-1} - A_{0s,j-1}}{\Delta t}, \right. \\ \left. \frac{A_{s,j+1} - A_{0s,j+1}}{\Delta t}, \dots, \frac{A_{rM} - A_{0s,N}}{\Delta t}, e_a, e_b, e_c \right) \\ \frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{\partial^2 A_{mk}}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{\partial^2 A_{mk}}{\partial y^2} = 0; \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Всі рівняння системи (8), розмірність якої дорівнює загальній кількості скінченних елементів, можна розділити на чотири типи, які відповідають чотирьом типам півобластей розрахункової області. Перше рівняння відповідає довільному скінченному елементу, що лежить всередині одного з пазів ротора. Друге рівняння описує елементи паза статора. Третє та четверте рівняння справедливі для скінченних елементів, розташованих відповідно в магнітопроводі та повітряному зазорі машини.

Таким чином, розв'язання системи рівнянь параболічного типу в частинних похідних методом скінченних елементів на непостійній сітці зводиться до циклічного алгоритму, на кожній ітерації якого здійснюється розв'язання

системи рівнянь (2.8) еліптичного типу на постійній в межах кожної ітерації сітці.

Обертання ротора у складі моделі необхідно враховувати на кожній ітерації відповідним кутом повороту ротора, що дозволяє одночасно врахувати зміну геометрії розрахункової області на зубцевому рівні.

З цією метою система (2.8) доповнюється рівнянням руху електропривода [3]:

$$M = M_c - j \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.9)$$

якій похідна від кутової швидкості за часом замінюється кінцевою різницею, вираженою через кут повороту ротора:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{-\varphi_{00} + 2\varphi_0 - \varphi}{(\Delta t)^2}. \quad (2.10)$$

де φ – кут повороту ротора на поточній ітерації; φ_0 , φ_{00} – кут повороту ротора відповідно на попередній та передпопередній ітераціях.

Підставивши вираз (2.10) в рівняння (2.9) та виразивши кут повороту ротора, остаточно отримаємо:

$$\varphi = \frac{(M - M_c)(\Delta t)^2 - j(\varphi_{00} - 2\varphi_0)}{j}. \quad (2.11)$$

Значення електромагнітного моменту M можна отримати через інтегрування тензора напружень Максвелла [6]. Оминаючи математичні викладки, наведемо формулу в кінцевому вигляді:

$$M = \frac{D_r - l_\delta}{2\mu_0} \oint_S B_n B_t dS, \quad (2.12)$$

де D_r - діаметр ротора; l_δ - ширина повітряного зазору; B_n , B_t - відповідно нормальна та тангенціальна складові вектора магнітної індукції відносно поверхні ротора. Інтегрування ведеться по поверхні, що оточує ротор і проходить через центр повітряного зазору.

Значення проєкцій вектора магнітної індукції на осі координат знаходяться з виразів, що впливають з визначення векторного магнітного потенціалу (2.4) та умови плоскопаралельності поля:

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}; \quad B_y = \frac{\partial A}{\partial x}. \quad (2.13)$$

Відповідно до (2.8), (2.11), (2.12) та (2/13) було розроблено алгоритм, що реалізує скінченно-елементну математичну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Слід окремо підкреслити, що при розробці моделі було використано наступні спрощення та допущення:

- магнітне поле в межах активного простору машини є плоскопаралельним;
- залежність між індукцією та напруженістю магнітного поля є лінійною;
- магнітопровід машини має нескінченний опір, тобто вихрові струми у сталі відсутні;
- з'єднувальні кільця «білячого колеса» ротора мають нульовий опір.

Блок-схема алгоритму представлена на рис. 2/2. На вхід системи обробки сигналів надходить інформація про статорний струм $i_s(t)$. Після відповідних перетворень на виході проміжного блоку формується основна складова статорного струму $i_{sf}(t)$, що відповідає частоті першої гармоніки живильної мережі двигуна. Якщо її видалити зі статорного струму, то вдається отримати залишковий струм, який характеризує відхилення форми струму статора від синусоїдальної.

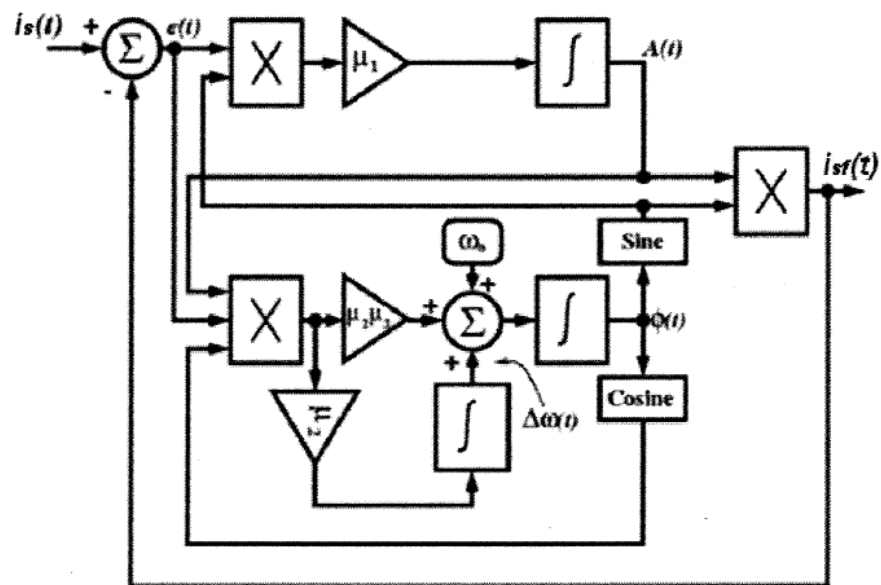


Рисунок 2.2 - Алгоритм для виділення основної складової з сигналу струму

2.2 Спектральний аналіз струму статора трифазного асинхронного двигуна за аварійних режимів роботи

У даному розділі розглянемо результати експериментального дослідження впливу аварійних режимів АД на спектр струму статора та розробимо алгоритм аналізу осцилограм для подальшої реалізації його на мікроконтролері. До аварійних режимів належать: обрив фази статора, міжвиткове замикання, несиметричність фаз. Також інтерес представляє дослідження впливу навантажувального режиму двигуна. Експериментальна установка була зібрана на основі трифазного електродвигуна АІР50В4N3, потужність якого складає 0,9 кВт, напруга – 220/380 В, номінальний струм – 0,37 А. В якості пристрою оцифрування даних була використана плата L-Card E-440 [8], оснащена 14-ти бітним АЦП, зі швидкістю опитування порту 400 кГц. Струм вимірювався за допомогою датчика струму ACS712-05В, принцип роботи якого заснований на ефекті Холла [3] (рис.2.3). Даний датчик струму має діапазон вимірювання $\pm 5\text{А}$ та уніфікований вихідний сигнал 0-5 В. Передача даних з плати L-Card E-440 на ЕОМ здійснювалась за допомогою інтерфейсу USB. Для побудови спектра струму було використано алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Даний алгоритм дозволяє скоротити обсяг обчислень у порівнянні зі звичайним дискретним перетворенням Фур'є (ДПФ) [14].

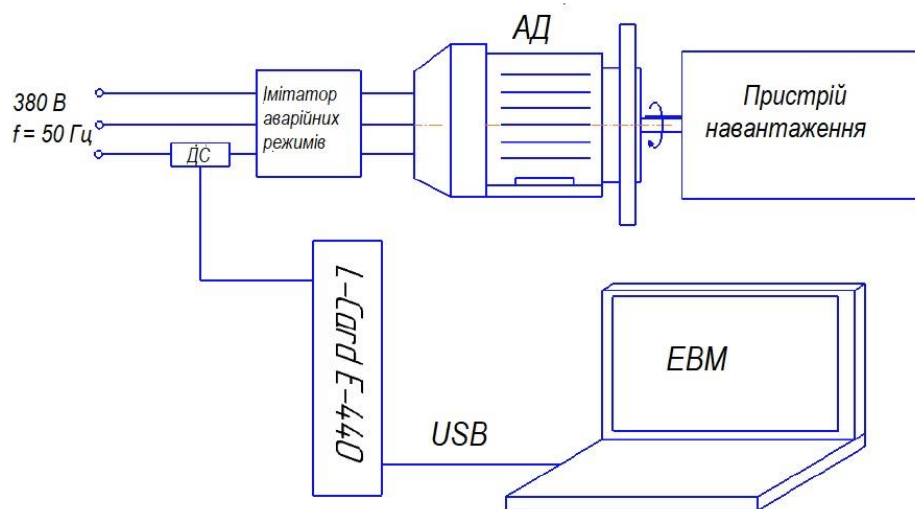


Рисунок 2.3 – Експериментальна установка

На установці імітувалися різні навантажувальні режими роботи АД: на холостому ході, під навантаженням, з обривом однієї з фаз, з перекосом фаз і міжвитковим замиканням.

Для обробки осцилограм використовувалось програмне середовище MathCad. Знято також осцилограми струму двигуна під час роботи в режимі навантаження та на холостому ході. Частота дискретизації була обрана рівною 10 кГц.

Довжина вибірки становила 8192 відліки. За допомогою ШПФ розраховано спектр сигналів.

На рис. 2.4 представлені спектри струму двигуна при холостому та навантажувальному режимах роботи. В якості навантажувального пристрою використовувався двигун постійного струму, включений в режимі генератора.

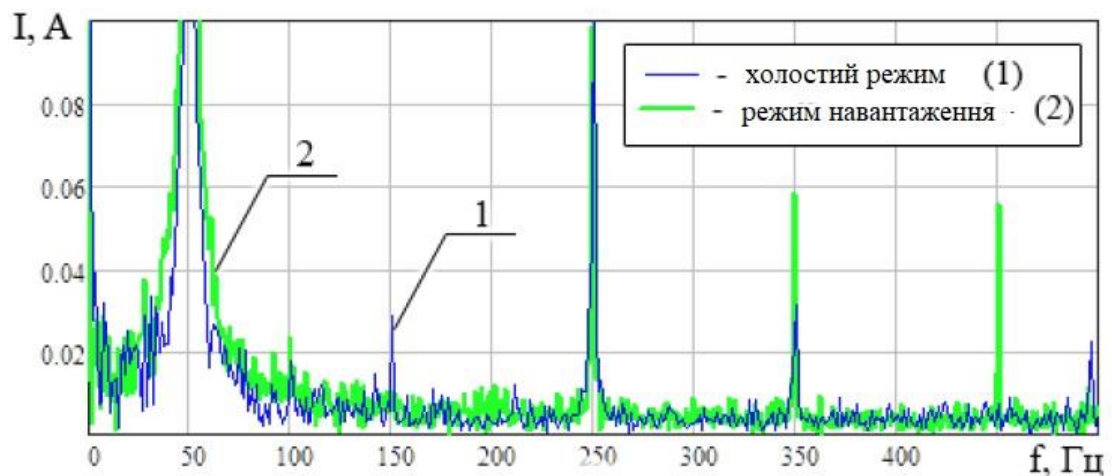


Рисунок 2.4 – Спектри струму двигуна при холостому та навантажувальному режимах роботи

Спектри сигналів на рис. 2.4 подібні та мають піки на одних і тих же гармоніках (50, 150, 250, 350, 450 Гц). Це відповідає непарним гармонікам 1, 3, 5, 7 та 9. З рис. 2.4 видно, що амплітуда гармонік при холостому ході менша, ніж при наявності навантаження. А на частоті 450 Гц пік при холостому ході взагалі відсутній.

На рис. 2.5 представлений спектр струму двигуна в нормальному режимі та при обриві однієї з фаз. На рис. 2.6 представлений спектр струму при його роботі в нормальному режимі та при перекосі однієї з фаз. Для імітації

перекосу фаз до однієї з фаз було послідовно підключено додатковий опір, що дорівнює опору обмотки (110 Ом).

На рис. 2.5 представлений спектр струму двигуна при його роботі в нормальному режимі та при імітації міжвиткового замикання в одній з фаз. Імітація міжвиткового замикання здійснена за допомогою введення в ланцюг паралельного опору номіналом 240 Ом.

Аналіз отриманих графіків виявив наступні результати. Порівняння графіків на рис. 2.4 показує, що обрив фази АД призводить до зростання гармонік з номерами №3 (3 дБ), №5 (1 дБ), №7 (1,7 дБ) (при обчисленні в дБ за базис прийнято амплітуду і-ої гармоніки спектра нормальної роботи АД). Також помітна поява піку в районі 490 Гц.

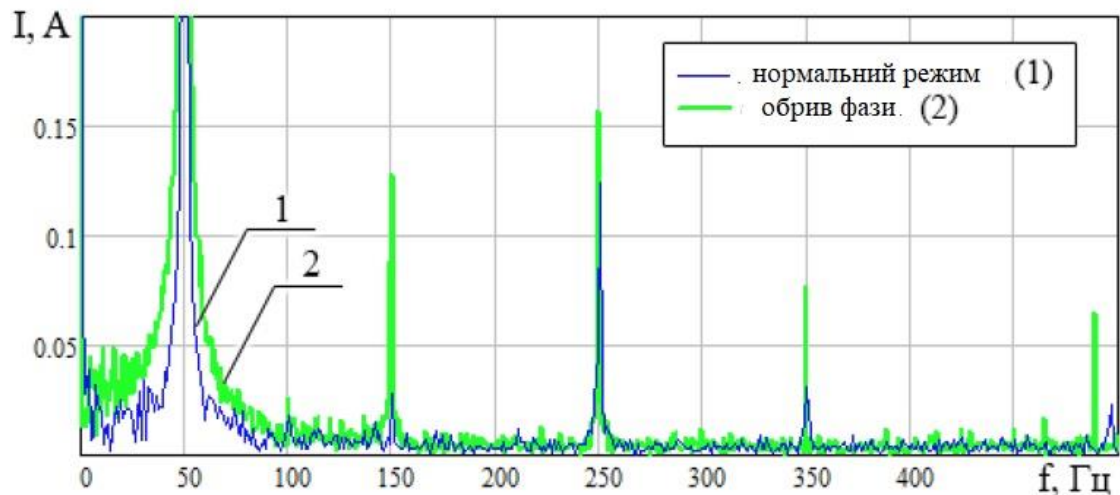


Рисунок 2.5 – Спектри струму двигуна під час його роботи в нормальному режимі та у разі обриву однієї з фаз

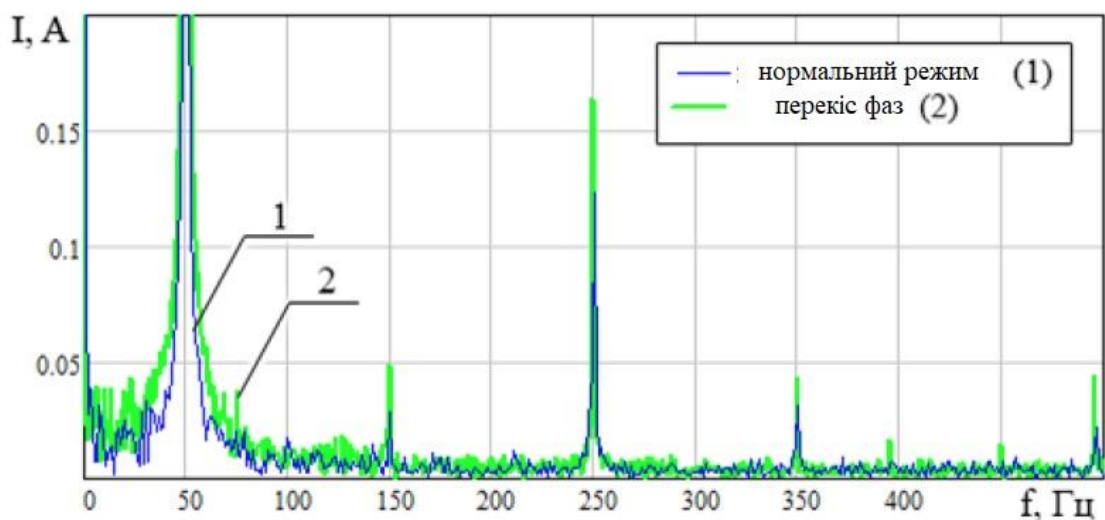


Рисунок 2.6 – Спектри струму двигуна під час його роботи в нормальному режимі та при перекосі однієї з фаз

Порівняння спектрограм на рис. 2.6 виявило, що при перекосі фаз також присутнє зростання гармонік №3 (1,6 дБ), №5 (1,3 дБ), №7 (1,6 дБ). При міжвитковому замиканні (рис. 2.7) гармоніка №3 зросла більш ніж на 4 дБ. Також різко проявилися майже всі інші непарні гармоніки: №5 (1,5 дБ), №7 (2 дБ), №9 (10 дБ). У спектрі додатково спостерігається прояв 8-ої (400 Гц) та 10-ої (490 Гц) гармонік.

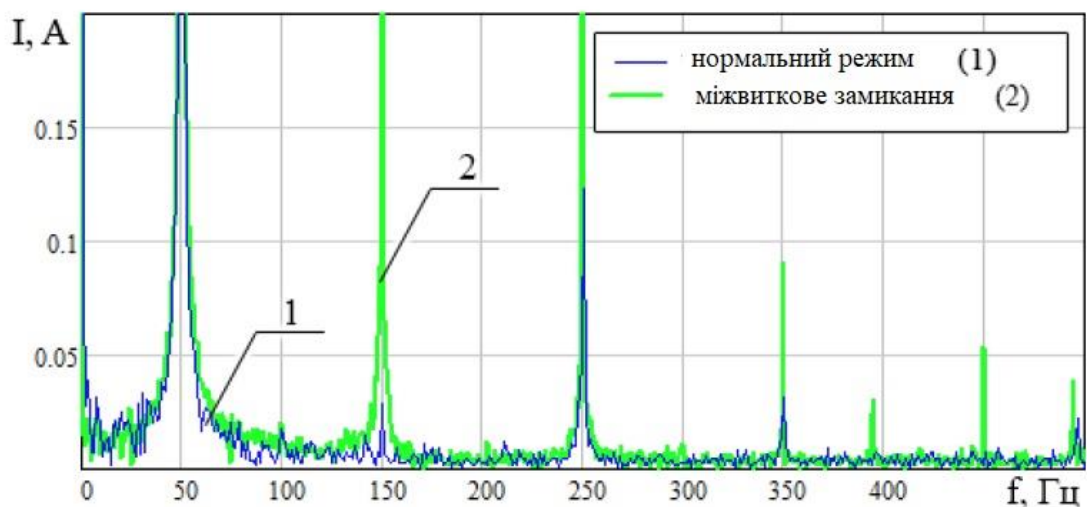


Рисунок 2.7. – Спектри струму двигуна під час його роботи в нормальному режимі та за міжвиткового замикання однієї з фаз

Експерименти показали хорошу відтворюваність. Результати різних дослідів для одного й того ж режиму відрізняються не більше ніж на 10%. Це дозволяє зробити висновок, що розроблена експериментальна установка є працездатною і дозволяє вимірювати осцилограму струму двигуна. Аналіз отриманих спектрів показав відмінності між режимами роботи АД, що дозволяє ідентифікувати аварійні режими роботи двигуна. Додатково передбачається внести нейронну мережу з метою ідентифікації виду режиму роботи АД.

Для реалізації системи діагностики передбачається використовувати високошвидкісний мікроконтролер STM32F4 з тактовою частотою 168 МГц. Наявність великого обсягу оперативної пам'яті дозволяє даному

мікроконтролеру виконувати перетворення Фур'є в реальному часі. Загальний алгоритм роботи системи може бути сформульований наступним чином: запис в масив вибірки значень з АЦП з частотою 10 кГц; швидке перетворення Фур'є масиву; обчислення амплітудного спектру сигналу; автоматичний аналіз спектру, підрахунок амплітуд гармонік спектру в діапазоні 0-1000 Гц; підстановка вектору амплітуд гармонік на вхід нейронної мережі та отримання результату.

Висновки по другому розділу

Запропонована методика комп'ютерних досліджень на основі моделей, що дозволяють реалізувати наявність у своєму складі різних несправностей дає можливість створити в кінцевому підсумку бібліотеку вейвлетних спектрів для кожного виду несправностей, що визначаються в динамічних режимах, і створити на цій основі сучасні комп'ютеризовані системи діагностування електродвигунів.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Як відомо, прогрес сучасної науки і техніки нерозривно пов'язаний із застосуванням електричної енергії в різних виробничих процесах. При цьому надійність і ресурс використовуваного електрообладнання та конструкцій визначають, так звані, зони концентрації напружень (ЗКН) - основні джерела розвитку пошкоджень. Зокрема, для асинхронних електродвигунів (АД), які отримали найбільше поширення в промисловості та сільському господарстві, ЗКН є обмотки статора, у зв'язку з чим всі інші елементи конструкції АД підбираються з урахуванням надійності ізоляції його обмоток (рис.3. 1) [1].

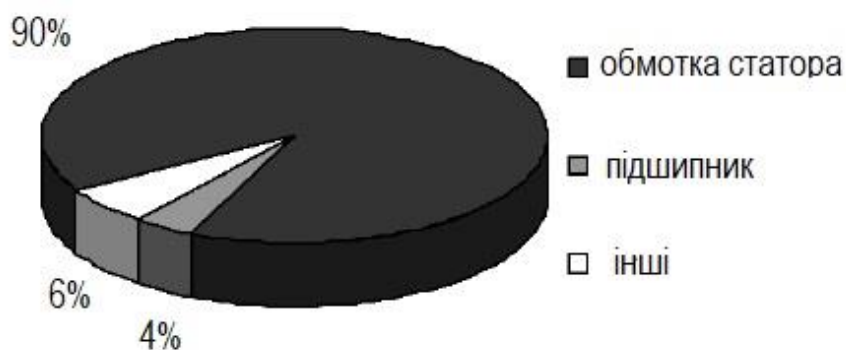


Рисунок 3.1 - Основні джерела розвитку пошкоджень електродвигуна

Проблема забезпечення високої надійності роботи електродвигунів з кожним роком стає все більш актуальною, оскільки старіння обладнання значно випереджає темпи технічного переозброєння. Зазначена проблема посилюється відсутністю науково-обґрунтованої концепції технічної діагностики та визначення ресурсу, а також недостатньою ефективністю традиційних методів діагностики та контролю.

Проведений авторами аналіз існуючих підходів до оцінки залишкового ресурсу старіючого обладнання, що склалися в різних галузях господарства країни, дозволив виявити спільні проблеми, що обумовлюють зазначену вище низьку ефективність традиційних методів діагностики.

Для оцінки стану розглядуваної електричної машини в цілому використовуються методи, які найчастіше базуються на вимірюванні наступних величин:

- к.к.д. двигуна;
- частоти обертання валу;
- вібрації машини;
- параметрів електромагнітного поля АД.

В даний час існують наступні методи функціонального діагностування електродвигунів:

- вібродіагностика;
- віброакустична діагностика;
- тепловий метод;
- спектральний аналіз фазних струмів.

Так, більшість сучасних методів вібраційної діагностики базується на аналізі вібрації працюючих машин та обладнання. Ці методи складають основу функціональної (робочої) діагностики, незважаючи на те, що режими роботи обладнання можуть бути самими різними - від усталених (номінальних або спеціальних) до перехідних, в т. ч. пускових, імпульсних і т. п. У функціональній діагностиці електродвигунів і обладнання за вібрацією використовується інформація, що міститься в характеристиках коливальних сил і властивостях коливальної системи.

Основним способом отримання діагностичної інформації є спектральний аналіз вібрації, що вимірюється в різних точках і напрямках. Спектральний аналіз низькочастотної вібрації електродвигунів та обладнання є одним з основних напрямків функціональної діагностики, що дозволяють виявляти до половини можливих дефектів машин роторного типу задовго до виникнення аварійної ситуації.

Основним недоліком цього методу є неможливість контролю стану ізоляції обмотки електричної машини, а за статистичними даними аварії через

пошкодження ізоляції складають значну частину із загального числа аварій [2].

У свою чергу, тепловий метод діагностування АД застосовується при їхніх робочих режимах функціонування [10]. При цьому визначаються параметри теплових процесів, що супроводжують електромагнітні процеси при порушеннях нормальних режимів та старінні конструкційних матеріалів, зокрема, температура в пазах статора, стрижнях ротора, щітково-контактного апарату, охолоджувальних рідин і т. д.

До недоліків теплового методу діагностування належать:

- складність реалізації контролю стану рухомих елементів об'єктів;
- велика теплова інерція, внаслідок чого по нагріву двигуна в цілому не можна зробити впевненого висновку про технічний стан його окремих частин;
- необхідність гарного доступу до окремих частин АД, як правило, важко доступним для спостереження теплового зображення в приймальних пристроях електронно-оптичного перетворювача, що часто буває практично ускладнено при експлуатації електродвигунів;
- відносно низька достовірність отримуваної інформації через проблему вибору оптимального режиму теплового контролю (якщо в якості дефектності обирати максимальний температурний перепад, то оптимальний нагрівач повинен мати якомога більшу потужність і працювати безкінечно);
- велика тривалість (фактично момент контролю зводиться до моменту досягнення об'єктом гранично допустимої температури).

Метод віброакустичної діагностики базується на вимірюванні вібраційних параметрів корпусу електричної машини та її рухомих вузлів [4]. Даний метод є найбільш поширеним для діагностики стану АД, тому що дозволяє не тільки виявити вже розвинену несправність та запобігти катастрофічним руйнуванням, але й виявити дефект, що розвивається, на дуже ранній стадії, що дає можливість прогнозувати аварійну ситуацію та обґрунтовано планувати терміни та обсяг ремонту обладнання. В якості еталону ви-

користуються характеристики того ж самого об'єкта діагностування, виміряні на початковому етапі його експлуатації.

Основні недоліки методу:

- множина станів може бути розділена на два класи: працездатний та непрацездатний, які мають велике число градацій і, отже, не можуть випромінювати чітко визначеного сигналу (варіації сигналів у межах одного класу станів є перешкодою для діагностування);

- низька захищеність методу від перешкод акустико-механічного характеру. Кожному стану електричної машини відповідає певний акустичний сигнал, який потрібно розпізнати в процесі діагностування. З нескінченного числа можливих станів АД має бути відібрано кінцеве число, яке підлягає розпізнаванню при діагностуванні. Отже, двигуни, що знаходяться в одному і тому ж номінальному стані, тобто в одному класі станів, випромінюють різні сигнали, хоча їх дійсні стани дещо різні;

- складність діагностичної задачі, яка полягає в тому, що оцінювати поведінку механізму доводиться тільки по вихідним коливальним процесам, не маючи апріорної інформації ні про фактичні вхідні впливи, ні про передаточні характеристики механічної системи;

- акустичні сигнали складних машин і механізмів - випадкові процеси, тоді як інформативними ознаками є досить складні характеристики процесів (кореляційні функції, біспектри, моментні функції розподілу ймовірностей і т.д.);

- проблема локалізації та ідентифікації джерел підвищеної віброактивності;

- акустичний сигнал має складну структуру, що залежить від динаміки механізму та взаємодії комплектуючих його вузлів.

Електричний метод діагностування базується на вимірюванні електричних параметрів, що включають в себе відхилення струмів і напруг від номінальних значень (по амплітуді, частоті, фазі), появу вищих гармонік у спектрі струмів, напруг і т. д.

Виникнення міжвиткових та міжфазних замикань, обрив стрижнів у короткозамкненому роторі, биття вала двигуна або генератора призводять до несиметрії фазних струмів, збільшення амплітуди вищих гармонік відносно першої гармоніки, причому останнє особливо характерно для третьої гармоніки. Дефекти підшипникового вузла або порушення центрування вала електродвигуна і привідного ним механізму викликають модуляцію електромагнітного моменту з частотою, пропорційною частоті обертання вала. Це тягне за собою появу в струмі статора додаткових гармонік з частотами, пропорційними частоті обертання. Порівняльний аналіз спектрів струмів досліджуваного двигуна та двигуна, умовно прийнятого за еталон, дозволяє виявити перелічені дефекти.

Залежно від способу отримання інформації даний метод може здійснюватися двома способами: контактним і безконтактним. Контактні вимірювання струмів зазвичай вимагають тимчасового відключення електричної машини від ланцюга живлення, що знижує оперативність діагностування і ускладнює процедуру вимірювання. При безконтактному способі найчастіше використовують датчики у вигляді струмових кліщів [5]. Недолік методу полягає в складності пошуку дефектного вузла. Виникнення міжвиткових і міжфазних замикань в обмотках асинхронного двигуна призводить до появи в спектрах фазних струмів високо- частотних гармонік. Наявність дефектів в підшипниковому вузлі електродвигуна або порушення центрування вала викликають періодичні зміни моменту опору, що також призводить до спотворення спектра фазних струмів, зокрема, в них з'являються гармоніки з комбінованими частотами. Амплітуда цих гармонік залежить від ступеня прояву дефекту, а також від напруги живлення. Таким чином, при наявності декількох джерел, що викликають схожі зміни діагностичних параметрів, дати однозначну оцінку технічного стану АД із зазначенням конкретного дефектного вузла дуже складно [11].

Вихрострумові методи ґрунтуються на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що

наводяться збуджувальною котушкою в електропровідному об'єкті контролю. Густина вихрових струмів в об'єкті залежить від геометричних та електромагнітних параметрів об'єкта, а також від взаємного розташування вимірювального вихрострумівого перетворювача (ВСП) та об'єкта. Як перетворювачі зазвичай використовують індуктивні котушки (одну або декілька). Синусоїдальний або імпульсний струм, що діє в котушках ВСП, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідному об'єкті. Електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушки перетворювача, наводячи в них ЕРС або змінюючи їх повний електричний опір. Реєструючи напругу на затисках котушки або їх опір, отримують інформацію про властивості об'єкта та про положення перетворювача відносно нього.

ЕРС (або опір) перетворювача залежить від багатьох параметрів об'єкта контролю, тобто інформація, що надається перетворювачем, є багатопараметровою. Це визначає як переваги, так і труднощі реалізації вихрострумівих методів (ВСМ). З одного боку, ВСМ дозволяють здійснити багатопараметровий контроль, з іншого – потрібні спеціальні прийоми для розділення інформації про окремі параметри об'єкта. Під час контролю одного з параметрів, вплив решти на сигнал перетворювача стає завадою, тому цей вплив необхідно зменшувати.

Особливість вихрострумівого контролю в тому, що його можна проводити без контакту перетворювача та об'єкта. Їх взаємодія відбувається зазвичай на відстанях, достатніх для вільного руху перетворювача відносно об'єкта (від часток міліметра до декількох міліметрів). Тому цими методами можна отримувати хороші результати контролю навіть при високих швидкостях руху об'єктів.

Отримання первинної інформації у вигляді електричних сигналів, безконтактність та висока продуктивність визначають широкі можливості автоматизації вихрострумівого контролю.

Одна з особливостей ВСК полягає в тому, що на сигнали перетворювача практично не впливають вологість, тиск і забрудненість газового середовища, радіоактивні випромінювання, забруднення поверхні об'єкта контролю непровідними речовинами.

Простота конструкції перетворювача - ще одна перевага ВСК (вихрострумовео контролю). У більшості випадків котушки поміщають у запобіжний корпус і заливають компаундами. Завдяки цьому вони стійкі до механічних і атмосферних впливів, можуть працювати в агресивних середовищах у широкому інтервалі температур і тисків. До цього часу вихрострумові методи використовувалися переважно для контролю якості електропровідних об'єктів: металів, сплавів, графіту, напівпровідників, а також для дефектоскопії, визначення розмірів і структуроскопії матеріалів і виробів [11]. У результаті проведеного комплексного дослідження авторами було запропоновано нову сферу застосування вихрострумовео контролю і розроблено метод діагностики, який дає можливість проводити оцінку стану асинхронних електродвигунів без контакту з перетворювачем, і дозволяє отримувати задовільні результати контролю без необхідності переривання звичайного режиму роботи АД (асинхронного двигуна).

Таким чином, в силу описаних вище причин, існуючі в даний час методи діагностики не можуть широко використовуватися на промислових і сільськогосподарських підприємствах. При цьому одним з головних недоліків всіх існуючих методів є використання в якості діагностичних величин непрямих параметрів, які свідчать про несправності, тоді як прямий параметр, визначає всі характеристики електродвигуна - це його зовнішнє магнітне поле (ЗМП). Крім того, застосовувані в даний час методи і засоби діагностики стану двигунів вимагають або розміщення безпосередньо на обладнанні спеціальних датчиків (вібродіагностика), або виведення АД з роботи (вимірювання опору ізоляції, опору обмоток і т. п.).

У свою чергу, при застосуванні методу вихрострумовео контролю в діагностиці електродвигунів, в якості збуджуючої котушки використовується

обмотка двигуна (ри- сунок 2). Інакше кажучи, процес діагностики АД вихрострумовим методом значно простіший, ніж в поширених сферах застосування вихрострумового контролю [8].

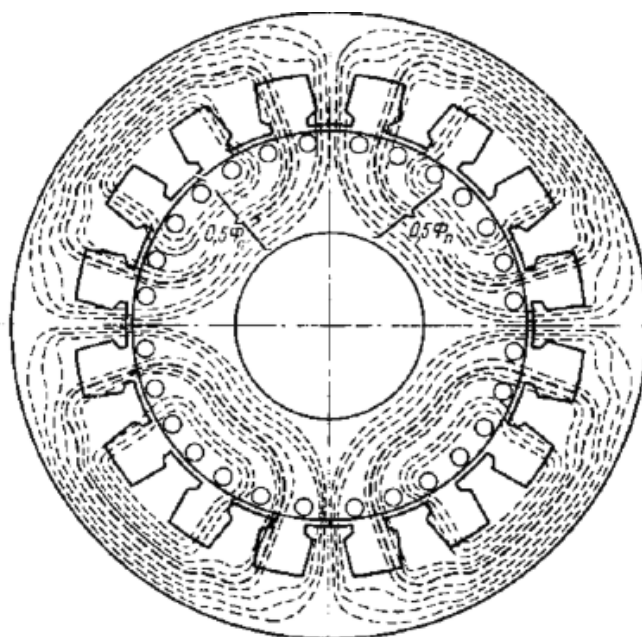


Рисунок 3.2 – Лінії напруженості магнітного поля всередині асинхронного двигуна

Виконані теоретичні дослідження дозволили встановити, що характер зовнішнього магнітного поля електричних машин значною мірою визначається різного роду несиметріями обмоток статора та магнітної системи. Несиметрії, обумовлені виниклими дефектами, змінюють характер зовнішнього магнітного поля, викликаючи спектр просторових гармонік напруженості, що дає можливість використовувати спектр напруженостей ЗМП для діагностування АД. Інші фактори, що впливають на вимірювання напруженості зовнішнього магнітного поля, не викликають утворення нових гармонік або непропорційного зростання вже наявних.

При цьому було отримано залежність між наявністю в двигуні дефектів і проявом непарних гармонік у спектрі напруженості ЗМП АД, що дало можливість розробити модель зовнішнього магнітного поля, яка дозволяє оперувати значеннями напруженості ЗМП перших 5-ти гармонік в залежності від стану ізоляції та конфігурації двигуна (розмір зазору, крок обмотки та ін.) без урахування екранування. Крім того, було експериментально доведено, що

наявність у спектрі напруженості ЗМП АД гармонік, кратних 3, є діагностичною ознакою міжвиткових та міжфазних замикань обмотки статора, а прояв гармонік, кратних 2 – ознакою ексцентриситету ротора.

При цьому обґрунтовано, що ЗМП АД доцільно заміряти на продовженні осі вала електродвигуна.

Таким чином, в результаті проведеного дослідження було встановлено:

1) при механічних пошкодженнях двигуна (нерівномірність повітряного зазору при несправностях підшипникового вузла або викривленні вала) спостерігається виникнення парних гармонік у спектрі напруженості ЗМП, що видно на рисунках 3.3 і 3.4;

2) при електричних несправностях двигуна відбувається зростання непарних гармонік електродвигуна відносно 1-ї, що добре помітно на рисунках 3.5 і 3.6.

При цьому відхилення параметрів напруги від нормованих показників якості електроенергії призводить лише до пропорційного зростання амплітуди гармонік.

Для того щоб уникнути впливу фактору якості електроенергії та фонових полів, доцільно розглядати в якості діагностичного параметра не значення амплітуд напруженостей різних гармонік, а відношення різниці розглядуваної гармоніки і будь-якої парної до різниці основного коливання і будь-якої парної гармоніки.

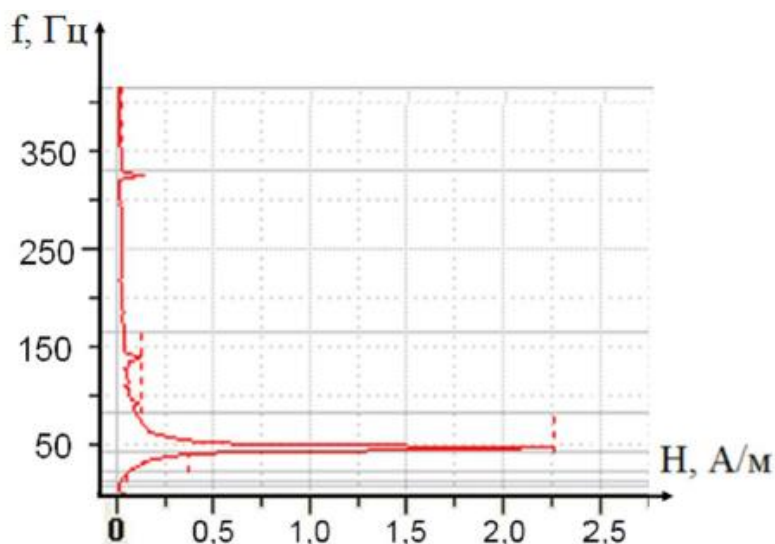


Рисунок 3.3 – Спектральний склад ВМП АД за відсутності механічних несправностей

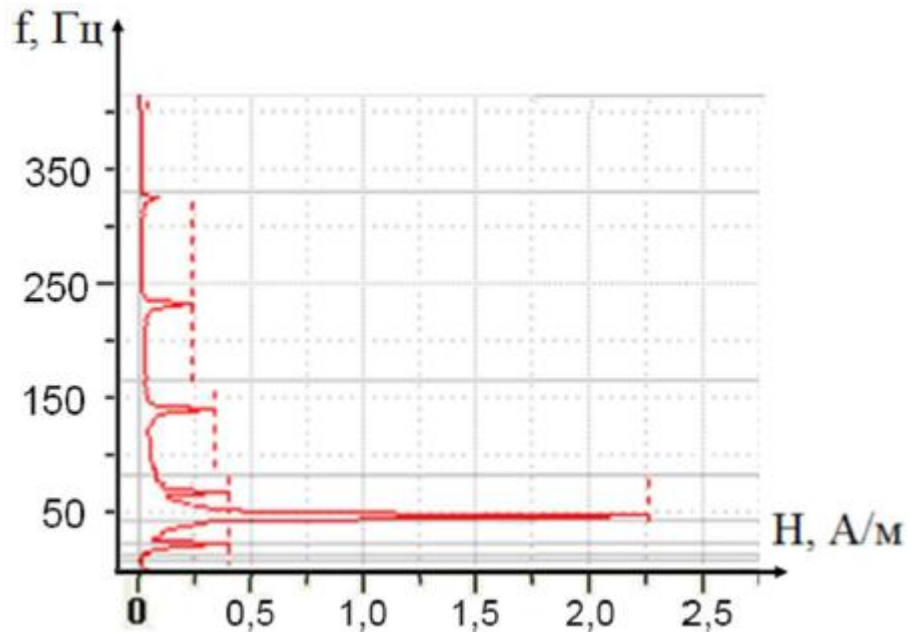


Рисунок 3.4 – Спектральний склад ВМП АД за ексцентриситету вала ротора

Таким чином, враховуючи, що фактори, які впливають на вимірювання напруженості зовнішнього магнітного поля, чинять пропорційний вплив на гармоніки напруженості ЗМП АД, було обрано діагностичний параметр – коефіцієнт гармонік, який дозволяє позбутися факторів, що впливають на поле двигуна, але не несуть інформації про його стан:

$$K_v = \frac{H_v - H_{2n}}{H_1 - H_{2n}},$$

де H_v - значення напруженості розглядуваної гармоніки; H_{2n} - значення напруженості будь-якої парної гармоніки; H_1 - значення напруженості основного коливання.

При цьому встановлено, що найбільш інформативною гармонікою є 3-тя, тому що вона проявляється як при міжвиткових замиканнях, так і при міжфазних.

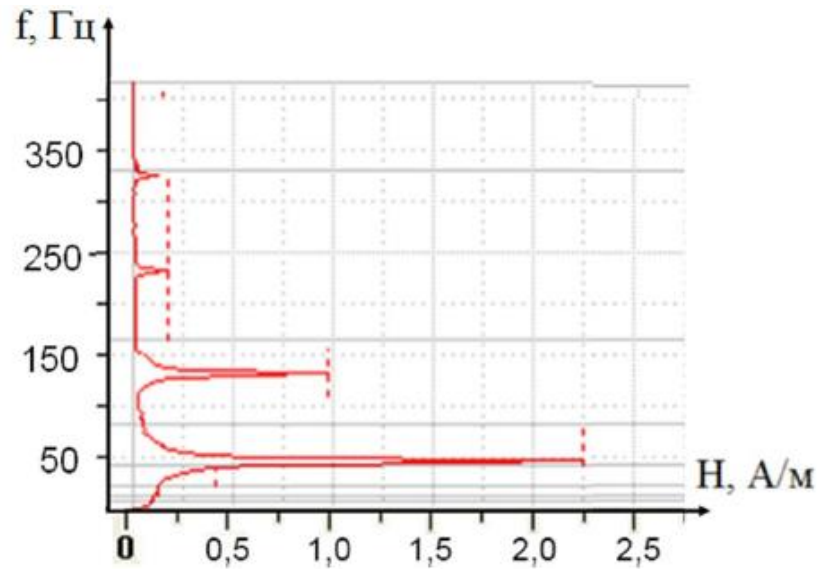


Рисунок 3.5 – Спектральний склад ВМП АТ при міжвитковому замиканні

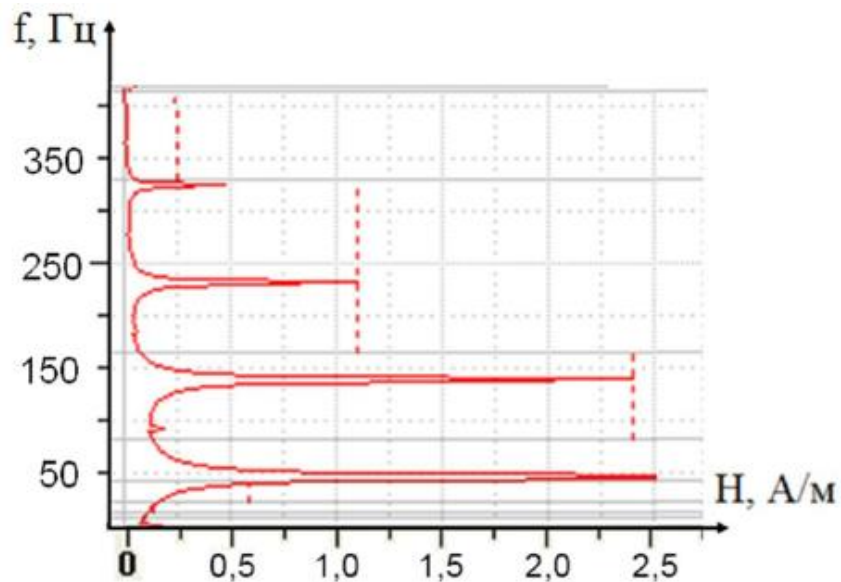


Рисунок 3.6 – Спектральний склад ВЧВ АТ при міжфазному замиканні

Діагностика шляхом порівняння коефіцієнтів гармонік дозволяє судити про наявність дефекту, оскільки існують чіткі відмінності між картинами напруженості зовнішнього магнітного поля при впливі різних факторів. Таким чином, з'являється можливість чітко визначати конкретний дефект у кожному випадку.

На основі отриманих результатів було розроблено основні принципи реєстрації напруженості ЗМП двигунів, а також інтерпретації отриманих результатів та судження про наявність і розвиток у двигуні дефектів. Дані принципи стали основою для створення нового методу оцінки стану

асинхронних електродвигунів у сільському господарстві на основі аналізу параметрів їх зовнішнього магнітного поля.

Крім того, з'явилася можливість робити прогноз про технічний стан електродвигуна за значенням коефіцієнта 3-ї гармоніки, за результатами якого можуть бути розроблені рекомендації щодо подальшої експлуатації електродвигуна в залежності від конкретних значень розглядуваного діагностичного параметра [12]. Експериментальні дослідження дозволили виділити 5 областей значень діагностичного параметра, кожна з котрих характеризується особливостями стану ізоляції обмотки статора АД:

- $K_3 < 0,1$ - двигун справний;
- $0,1 < K_3 < 0,4$ - стан двигуна нестабільний, характеризується інтенсивним пошкодженням ізоляції та швидким переходом у небезпечну стадію;
- $0,4 < K_3 < 0,7$ - небезпечний стан двигуна, можливий раптовий вихід з ладу;
- $K_3 > 0,7$ - критичний стан (дане значення було досягнуто в лабораторних умовах шляхом моделювання дефекту вже після запуску електродвигуна).

Висновки по третьому розділу

Даний метод не потребує великої кількості операцій та спеціальних навичок, а також характеризується високою достовірністю отримуваної інформації, наочністю та простотою реалізації, що особливо актуально для двигунів, які використовуються в агропромисловому комплексі. Крім того, метод дозволяє коригувати режим роботи електрообладнання, планові діагностики та ремонти. Як наслідок, це підвищить коефіцієнт використання, що дозволить оптимізувати розподіл фінансових коштів підприємства на своєчасний ремонт та технічне обслуговування .

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз основних концепцій існуючих технічних рішень зі створення систем моніторингу електричних машин. Показано, що системи моніторингу, засновані на сигнатурному аналізі струмів статора, вирішують поставлену задачу частково.

2. Зазначено, що застосування систем моніторингу, заснованих на широкому охопленні параметрів контролю, слід брати до уваги вже на стадії проєктування та виготовлення електричних машин. До системи моніторингу слід включати необхідну кількість важливих і надійно контрольованих параметрів, що забезпечують захист електричної машини від серйозних пошкоджень. Через слабку завадостійкість до системи моніторингу нераціонально включати вимірювання часткових розрядів.

3. Проблемною ланкою у створенні та успішному застосуванні систем моніторингу є інтерпретація отриманих даних. Відсутність таких напрацювань є основною перешкодою для впровадження систем моніторингу в практику.

4. Оперативне виявлення дефектів, що виникли після відключення електричної машини, слід покладати на іншу, мобільну систему, яку можна розглядати як другий рівень системи моніторингу.

5. Застосування комплексних систем діагностики електродвигунів, зокрема багатопараметричних методів, дозволяє реалізувати технологію обслуговування обладнання за фактичним станом, актуальну для вітчизняної енергетики.

6. В ході виконаного дослідження встановлено, що вибір методу діагностики залежить від зовнішніх умов, режиму роботи електрообладнання, однотипності діагностованих об'єктів, рівня кваліфікації обслуговуючого персоналу та фінансового становища підприємства. Разом з тим, необхідно пам'ятати, що діагностика асинхронних електродвигунів, в першу чергу, повинна переслідувати мету визначення стану ізоляції обмоток статора АД, однак не всі існуючі методи здатні адекватно оцінити стан цієї зони в умовах агропромислового комплексу України. Застосування розробленого авторами

методу в умовах сільського господарства дозволить значно скоротити кількість передчасних відмов електродвигунів, а також в цілому підвищити ефективність агропромислового виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Єсаулов С. М. Аналіз, синтез і проектування цифрових систем керування : навч. посібник / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 146 с
2. Шавкун В. М. Сучасні технології діагностики електромехатронних систем : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / В. М. Шавкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 89 с.
3. https://pribory.online/p1981875577-mnogofunktsionalnyj-analizator-kachestva.html?source=merchant_center&gad_source
4. Діагностика стану електротехнічного обладнання: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Р. Проценко Я. – Електронні текстові дані (1 файл:5,06 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.
5. ДСТУ ISO 2365-94 Машини електричні асинхронні потужністю до 400 кВт. Двигуни
6. Time frequency spectrum of line current during starting process – a tool for diagnosing failures in induction motor / J. Jianguo [et al] // Proc. ICEM. 1992. P. 1261–1265.
7. Asynchronous motor cage fault detection through electromagnetic torque measurement / F. Thollon [etal] // Proc ETEP. 1993. Vol. 3, № 5. P. 556–560.
8. L-CARD. Преобразователи напряжения измерительные E14. URL: www.lcard.ru/download/descr_type_e14.pdf.
9. Popovic R.S. Hall Effect Devices. Second Edition. CRC Press, 2003, 420 p.

10. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О.В. Губаревич. – Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с.; табл. 6, іл. 20, бібліогр. 44 найм
11. Овчаров В.В., Рижков А.О. Діагностування експлуатаційних режимів роботи і захист асинхронного двигуна за температурою сталі та кратністю сили струму // Наукові доповіді НАУ. – 2006. – № 3. – С. 21–28.
12. Метод оценки технического состояния машин: патент Украины № 13540 // А. А. Стеценко [и др.]. 2004. Бюл. № 7.
13. Купін А. І., Кузнецов Д. І. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації. – Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2016. – 200 с
14. Вовк О.Ю. Метод періодичного діагностування асинхронних двигунів/О.Ю. Вовк, Л.М. Безменнікова, С.О. Квітка // Праці ТДАТУ. – 2010. – № 10, Т4. – с. 39-46.
15. Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі Mathcad / Е.М. Немцев // Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: Електротехніка і енергетика. Всеукраїнський науковий збірник №1(19) – 2(20)'2018, Покровськ: ДВНЗ ДонНТУ, с. 75 – 81.